

Capítulo 7

Conclusiones

7.1 Conclusiones

7.1.1 Principales resultados obtenidos

7.1.1.1 Introducción

Se ha mostrado que las juntas T-bolt tienen una aceptación cada vez mayor dentro de la industria eólica para la realización de la unión entre la pala y el buje de grandes aerogeneradores. Entre las principales cualidades que la hacen idónea para esta aplicación están su elevada fiabilidad, su facilidad de montaje y su coste relativamente bajo en comparación con otras soluciones. En cambio, como principal inconveniente presenta el tener una eficiencia más bien reducida.

Se ha realizado un análisis de los distintos aspectos que influyen en el diseño de las uniones T-bolt, mostrando la influencia de los distintos parámetros geométricos (especialmente d/D , w/D , t/D y e/D) y de la pretensión del vástago. Ésta última tiene un papel fundamental en la reducción de las cargas de fatiga del vástago, por lo que debe presentar un valor suficiente para evitar la apertura de la junta en condiciones normales de servicio, pero al mismo tiempo no debe estar sobredimensionada, ya que esto podría penalizar la resistencia de la junta, especialmente frente a cargas extremas.

A partir del análisis paramétrico se ha demostrado que, para poder realizar un análisis completo e intentar aumentar la eficiencia de la junta, el principal obstáculo es la falta de conocimiento sobre los distintos modos de rotura del laminado en la zona de la T-bolt, ya que el resto de elementos están constituidos de acero, material mucho más estudiado y con un comportamiento más sencillo. Por este motivo, los análisis numéricos y experimentales que se han desarrollado se centran en el estudio del laminado.

7.1.1.2 Análisis numérico

Para el estudio del laminado por el método de los elementos finitos, se ha desarrollado un mallador paramétrico capaz de generar, de forma automática, mallas estructuradas para cualquier geometría de la T-bolt. Asimismo, como el modelo ha debido realizarse asumiendo un material ortótropo, se ha desarrollado un procedimiento innovador para la determinación de las propiedades ortotrópicas equivalentes del material, a partir de las propiedades tridimensionales del material que forma cada una de las láminas. Utilizando un modelo simple de elementos finitos se ha comprobado que el

nuevo método permite obtener, para las constantes fuera del plano, valores más aproximados que los utilizados típicamente hasta ahora. Además, el modelo presenta la notable ventaja de ser útil en situaciones en las que se combinan capas finas de distintos materiales.

Antes de atacar el problema de la T-bolt, el modelo utilizado (con las variaciones imprescindibles) ha sido contrastado con los existentes en la literatura (Crews *et al.*, 1981) (apéndice A) encontrándose una buena correlación. Por otra parte, los resultados obtenidos para la T-bolt se han contrastado con los valores experimentales obtenidos para la repartición de cargas entre los distintos elementos de la junta, para lo que se han obtenido correlaciones con errores del orden del 5% en la estimación de las rigideces aparentes de los distintos elementos. En la otra comprobación experimental realizada, consistente en la obtención por el método fotoelástico de los contornos de iso-deformación cortante máxima y su comparación con los resultados numéricos obtenidos, se observa que, a partir de distancias del orden de $0.25D$, los niveles de deformación son comparables, mientras que en las zonas más próximas a la superficie del bulón la influencia de las pequeñas irregularidades en el agujero y el bulón introducen grandes concentraciones de esfuerzos en puntos muy localizados de la zona de contacto.

En el apartado 4.3.3 se ha analizado lo que sería una junta T-bolt típica utilizada en la unión entre la pala y el buje de un aerogenerador, formada por un laminado casi-isótropo a base de fibra de vidrio y epoxy, con las siguientes dimensiones: $d = 24$ mm, $D = 48$ mm, $w = 96$ mm, $t = 72$ mm, $e = 120$ mm, $th = 120$ mm. Estas medidas son del orden de las que podemos encontrar en algunos diseños comerciales de palas para rotores de unos 70 m de diámetro.

Los resultados obtenidos demuestran que la componente σ_x es la que presenta los valores más elevados, tal como era de esperar, teniendo en cuenta que tanto la carga exterior y la fuerza de pretensión, como la dirección principal del laminado son paralelos a este eje. Comparando los máximos de los valores absolutos de las zonas de tensión neta y compresión local para la carga máxima aplicada, se puede observar cómo en la zona de tensión neta este máximo es 1.5 veces superior al máximo en compresión local. Esto resulta razonable, teniendo en cuenta que los estados de esfuerzos en esa zona son mucho más complicados, y que hasta ahora no se disponía de datos sobre la carga de rotura en compresión local para este tipo de probetas.

Los niveles alcanzados por el resto de componentes de esfuerzo son considerablemente inferiores. Ahora bien, si se analizan los resultados a nivel de deformaciones, vemos que para las componentes ε_y y γ_{xy} se obtienen valores del mismo orden que para ε_x , por lo que éstas pueden producir esfuerzos importantes en las capas orientadas a 90 y $\pm 45^\circ$. Ello indica que estas dos componentes pueden tener un papel importante en el inicio del fallo y/o en la relajación de esfuerzos en este tipo de probetas.

En cuanto a las componentes fuera del plano, hay que recalcar los siguientes puntos:

- Mediante el modelo utilizado no es posible obtener los esfuerzos interlaminares que podrían tener una cierta influencia en el desarrollo de los distintos modos de fallo, especialmente el de compresión local.
- Los esfuerzos y deformaciones obtenidos para el material ortótropo equivalente tienen poca importancia comparados con las componentes en-el-plano, aunque, como se observa en los ensayos, es posible que éstos adquieran mayor importancia una vez que ya se ha iniciado el fallo y se han degradado las propiedades del material en algunas zonas.

Finalmente, cabe destacar que el esfuerzo máximo que se alcanza en el laminado en dirección X es del orden de 160 MPa, que corresponde a un 30% del esfuerzo de rotura del laminado. Podría

pensarse que esto supone un margen de seguridad excesivamente elevado, si bien conviene tener en cuenta que, especialmente en la zona compresión local, el material se encuentra sometido a esfuerzos biaxiales que no aparecen en una probeta a tracción. Por otra parte, para este nivel de esfuerzos, las deformaciones en algunas zonas puntuales, superan ligeramente las $4000 \mu\epsilon$, que es el límite a partir del cual se considera que van a empezar a aparecer grietas en la matriz del laminado.

A continuación, se ha analizado la evolución de la superficie de contacto en función de la relación P/F_0 , llegándose a la conclusión de que ésta se mantiene aproximadamente constante hasta que se produce la apertura de la junta, momento en el que se produce un importante aumento de la misma. Después de la apertura de la junta, el área de contacto prácticamente abarca toda la mitad inferior del bulón.

Comparando los resultados obtenidos para la geometría estándar de la junta T-bolt con una hipotética junta a solape doble con las mismas relaciones w/D , e/D y t/D , y formada por el mismo laminado, se puede observar que en la zona de tensión neta los resultados son prácticamente idénticos, con diferencias que apenas alcanzan el 4% entre puntos homólogos. En cambio, en la zona de compresión local los esfuerzos en dirección X son del orden de un 30% superiores en el caso de la junta T-bolt, lo cual no puede atribuirse únicamente a la reducción de área resistente producida por la introducción del agujero del vástago.

A nivel de lámina, es interesante observar que, en las capas a 0 y 90° , los máximos, tanto el positivo como el negativo, se producen en la zona de tensión neta y de compresión local respectivamente, siendo los esfuerzos en la capa a 90° significativamente inferiores a los de las capas orientadas a 0° . En cambio, en las capas a $\pm 45^\circ$ los máximos se producen aproximadamente a $\pm 45^\circ$ de la zona de tensión neta y alcanzan valores incluso superiores a los obtenidos en las láminas a 0° . Esta situación es muy parecida a la que encontramos en juntas a solape y nos indica la posibilidad de que la rotura de algunas fibras en las capas a $\pm 45^\circ$ contribuya a producir una cierta redistribución de esfuerzos previos a la rotura de las capas a 0° .

Finalmente, se ha demostrado que, en primera aproximación, es posible estudiar las uniones de la raíz de la pala de un aerogenerador, que presentan cierta curvatura, mediante la aproximación de asumir un laminado plano, ya que las diferencias obtenidas entre ambos modelos son muy reducidas. De todas formas, hay que tener en cuenta que esto puede afirmarse en el caso de que la brida a la que se une la pala tenga una rigidez suficiente. En caso contrario, se podrían introducir peligrosos momentos en los vástagos y excesivas deformaciones en las pistas de los cojinetes (en el supuesto de que se tratase de palas de paso variable).

7.1.1.3 Análisis experimental

La tarea central del análisis experimental ha consistido en el ensayo a rotura de una serie de especímenes, fabricados a partir de dos laminados distintos a base de fibra de vidrio y epoxy. Para cada tipo de material se han utilizado dos geometrías distintas, con el fin de obtener el fallo del laminado en tensión neta o en compresión local.

Con el fin de obtener el máximo de información de cada ensayo, aparte de registrar las cargas de rotura de cada probeta, se han obtenido también las curvas de carga-alargamiento (a partir de las que se han construido luego las de esfuerzo-deformación). También se ha realizado un registro de la emisión sonora durante el ensayo y se ha realizado un análisis del estado de las probetas después del fallo tanto desde un punto de vista exterior, como a partir de la realización de cortes y secciones en las áreas de mayor interés.

El registro de las emisiones sonoras de cada espécimen tenía como objetivo permitir incluir la información referente a este parámetro, de una forma precisa y objetiva, en el análisis de los resultados. Sin embargo, dado el gran número de eventos de emisión que se producen a lo largo de cada ensayo y la reducida magnitud de la energía asociada a estos eventos, se ha tenido que desarrollar una técnica especial que permitiera realizar una cuantificación de los mismos. Esta técnica se basa en la obtención de espectrogramas de la onda original y la suma de los valores logarítmicos de los mismos para cada instante de tiempo, y ha mostrado tener un buen nivel de repetitividad y una alta sensibilidad. El programa informático desarrollado permite el conteo del número de eventos de emisión de cualquier onda registrada en formato digital, permitiendo definir el umbral de detección en función de la relación entre el ruido de fondo y el nivel de las emisiones.

Respecto a los especímenes con fallo en compresión local, se han obtenido valores de esfuerzo medio (S_b) entre el 60 y el 65% de la carga de rotura a tracción del material, lo cual supone una reducción significativa respecto a los valores que se obtendrían en uniones a solape, que podrían ser del 80% sin ningún tipo de apriete, o incluso alcanzar el 100% en juntas típicas con apriete lateral. Esto refleja la gran influencia del agujero del vástago en la resistencia en compresión local del laminado, que va más allá de la simple reducción de área resistente.

Otro aspecto a destacar respecto al fallo en compresión local del laminado es que, al contrario de lo que sucede en juntas a solape, a partir del instante en que se inicia el fallo de la junta, ésta no admite prácticamente ningún incremento de carga. Se ha comprobado que esto se debe simplemente a que, estas juntas no presentan ningún tipo de apriete o restricción lateral, ya que se ha observado que en la primera probeta ensayada en compresión local este incremento de carga (de hasta un 30%) sí se produjo, debido a un problema en el diseño del utillaje que presentaba una holgura demasiado estrecha y actuaba como retén lateral.

A pesar de lo dicho, la rotura en compresión local no tiene una naturaleza catastrófica, puesto que a partir del momento del inicio del fallo hasta que se produce una caída importante de la capacidad de carga, la junta admite una importante deformación, que en caso de uniones multi-junta permitiría una amplia redistribución de esfuerzos. El alargamiento adicional que admite la junta a partir del inicio del fallo depende en gran medida del tipo de laminado, ya que en el laminado tipo A (baja fracción de fibras, fibras y capas de reducido espesor) éste es varias veces superior al alargamiento anterior al inicio del fallo, mientras que en el laminado tipo M (alta fracción de fibras, láminas de gran espesor) el alargamiento adicional es en el orden del 50%.

También se ha detectado una gran influencia del tipo de laminado en los mecanismos de fallo: mientras que en el laminado tipo A (más homogéneo) el mecanismo dominante que se detecta es el pandeo de las fibras, en el caso del laminado tipo M el fallo se inicia claramente con la aparición de grandes delaminaciones en las proximidades de las capas a 0°.

El fallo por desgarre, a pesar de estar trabajando con la junta totalmente abierta, tan sólo se ha presentado en el caso de la junta con restricción lateral, y ésta tuvo lugar después de un alargamiento del agujero del bulón muy importante y un incremento de carga respecto al inicio del fallo del 30%. Ambos factores combinados, hacen que, en juntas reales, en las que no existen restricciones laterales y, al mismo tiempo, se produce una redistribución de la carga entre varias juntas en cuanto se produce una pequeña deformación en una de ellas, sea prácticamente imposible que se produzca este tipo de fallo, si se utilizan laminados casi-isótropos y una relación e/D igual o superior a 2.5.

En cuanto a las emisiones sonoras existe una gran diferencia entre los resultados obtenidos para las probetas de material tipo A y tipo M. Mientras que las probetas tipo A no presentan apenas emisiones hasta que se alcanza del orden del 70% de la carga de rotura y a partir de este momento se produce un incremento bastante rápido de las mismas, en las probetas tipo M las emisiones se inician para

cargas muy reducidas (del orden del 30% de la carga de rotura) y su densidad crece de forma más o menos lineal hasta el fallo de la junta. Estas diferencias se explican, en parte, por las diferencias entre los constituyentes de ambos materiales, ya que, al estar el material M, formado por fibras de gran diámetro, es más fácil que incluso una rotura de una sola fibra pueda ser detectada, mientras que en el material tipo A esto resulta imposible. La otra parte de la explicación puede proceder del distinto diseño de ambas probetas, porque en el caso de las probetas de material A el agujero del vástago es mucho menor que en el caso de las probetas tipo M, lo que hace que el área resistente a compresión local sea mayor y que, en consecuencia, se puedan producir con mayor facilidad, acoplamientos entre los modos de rotura de compresión local y tensión neta, lo cual haría crecer el número de emisiones en un instante dado.

El esfuerzo medio en tensión neta obtenido para ambos materiales se sitúa entre el 51 y el 58% de la carga de rotura del laminado, lo que supone prácticamente el mismo valor que se obtendría en juntas a solape. Esto indica, que a pesar del elevado espesor del laminado y de la presencia del agujero del bulón, el fallo en tensión neta viene determinado por los mismos factores que en el caso de juntas a solape doble.

De esta manera, no es de extrañar que al igual que pasa en las juntas a solape, este tipo de fallo tenga una naturaleza totalmente catastrófica con una caída total de la capacidad de carga, apenas iniciado el fallo.

Respecto a los mecanismos de fallo, al igual que en el caso de compresión local, para el laminado M se aprecian un mayor número de delaminaciones. Estas delaminaciones, anteriores al fallo definitivo a tracción, debido a la redistribución de esfuerzos que provocan, probablemente sean las responsables de la mayor eficiencia de las probetas MN respecto a las AN.

En cuanto a la emisión sonora de las probetas con fallo en tensión neta, los resultados son muy similares para los dos tipos de laminado, con un incremento muy importante de emisiones alrededor del 90% de la carga de rotura. La única diferencia entre ambos materiales consiste, al igual que en el caso de compresión local, que para el material tipo M se detecta algún evento prácticamente desde el inicio del ensayo. De todas maneras, estos eventos no tienen ninguna relevancia respecto a la degradación del material ni guardan ninguna relación con el fallo del espécimen.

7.1.1.4 Predicción del fallo

Se ha verificado la posibilidad de predecir el fallo del laminado a partir del modelo numérico expuesto en los capítulos anteriores, combinado con algunos ensayos experimentales simples.

Concretamente, se ha demostrado la posibilidad de predecir el fallo del laminado, utilizando el método del *Point Stress*, estimando el esfuerzo de rotura mediante un ensayo a tracción del laminado, y la distancia característica d_0 a partir de un ensayo con agujero cargado. Ambos ensayos tienen la ventaja de que se pueden realizar con laminados de espesor muy inferior al de la junta T-bolt a diseñar. El parámetro d_0 estimado para un tipo de laminado (tipo M) se ha utilizado para el laminado tipo A con resultados muy satisfactorios, lo que parece indicar que, para laminados casi-isótropos similares a los ensayados, este parámetro puede ser más o menos constante (≈ 0.9 mm). De todas formas, este extremo debe ser verificado utilizando otros laminados.

La predicción de la carga máxima admisible en compresión local puede hacerse comparando los esfuerzos calculados para la carga de rotura de una probeta de agujero cargado (tipo solape doble) de unos 9 mm de espesor, en el plano de compresión local, con los que se obtienen para la T-bolt en la misma zona¹. En este caso, no se ha podido utilizar el método del *Point Stress*, debido a

¹ Ambas curvas son estimadas por el método de los elementos finitos.

que los esfuerzos de pico obtenidos no alcanzan los valores de rotura a tracción de los laminados correspondientes, y no se dispone de valores fiables de la resistencia a compresión.

Un aspecto interesante es que, a pesar de que el modelo de elementos finitos utilizado no tiene en cuenta la degradación progresiva del material, la carga a la que el valor de pico en tensión neta del modelo numérico alcanza el valor de rotura coincide con aquella a la que se detectan los incrementos de emisiones acústicas en los ensayos, con una precisión del orden del 10% del lado de la seguridad. Este hecho sólo se verifica en la zona de tensión neta.

7.2 Consideraciones de diseño y líneas de investigación futuras

7.2.1 El diseño de la T-bolt

Como ya se ha comentado en la introducción, el diseño actual de las juntas T-bolt se basa, en gran medida, en la experiencia y criterio del propio diseñador, así como en la utilización de una serie de relaciones geométricas con las que se han obtenido resultados satisfactorios en diseños anteriores.

Los resultados obtenidos en el presente trabajo nos permiten analizar de forma cuantitativa algunos aspectos del diseño actual “estándar” que, en algunos casos, solamente podían analizarse de forma cualitativa.

- El fusible mecánico de la junta es el vástago, con una carga de fluencia entre 4.5 y 5 veces inferior a la carga de rotura del laminado en tensión neta².
- Respecto a la rotura en compresión local el margen es también del orden de 5 veces la carga de fluencia del vástago (ver nota2).
- Los puntos anteriores indican que, de acuerdo con los ensayos realizados, y los esfuerzos calculados, los cargas de fallo en tensión neta y compresión local se encuentran muy equilibradas.
- Para este nivel de cargas, según el modelo de elementos finitos, tan sólo se alcanzan las 4000 $\mu\epsilon$ en algunas áreas muy locales, lo que indica que en la mayor parte del laminado apenas deberían aparecer grietas en la matriz, incluso para las cargas extremas.

Como resumen podemos decir que el diseño actual se puede considerar una solución equilibrada, que sin embargo presenta importantes posibilidades de optimización. A continuación se comentan algunas de estas posibilidades, aunque debe tenerse en cuenta que cualquiera de estas optimizaciones conllevaría alterar algunos criterios establecidos por organismos homologadores, como el límite de 100 MPa de esfuerzo de compresión local medio, que impone el *Germanischer Lloyd*, lo cual implicaría probablemente la realización de extensos estudios experimentales.

La primera optimización que sería posible es una reducción del espesor relativo del laminado. Ello que, por una parte, conllevaría un ahorro de material y un incremento de la eficiencia de la junta, que podría llegar a duplicarse, conservando el papel de fusible para el vástago con un margen de seguridad elevado, por otro lado, haría más improbable el fallo en tensión neta, mucho más catastrófico

²Estos valores se han estimado a partir de los resultados obtenidos para el laminado tipo M. Para laminados con un menor porcentaje de fibra estos valores podrían reducirse hasta valores entre 3.5 y 4, para el caso de tensión neta, y 4 para el caso de compresión local.

que el de compresión local. El problema que conlleva esta reducción de espesor, es que como se ha señalado anteriormente, implicaría aceptar la aparición de grietas en la matriz, las cuales, si bien está claro que no suponen ningún riesgo para la integridad a corto plazo de la junta, debería investigarse más a fondo su influencia a lo largo de todo el ciclo de vida de la junta.

Una variación con un efecto muy similar a la reducción del espesor respecto a D consiste en aumentar la relación D/d , desde $1/2$ hasta prácticamente $2/3$, ya que en los ensayos realizados se ha utilizado esta relación sin problemas (aunque sólo para cargas estáticas). Este simple cambio puede suponer un incremento del 30% en la eficiencia de la junta. Los inconvenientes que puede presentar son similares a los de la reducción del espesor y además obligaría a los fabricantes a ser especialmente cuidadosos con las propiedades del material del bulón, que debe tener siempre características similares a las del vástago.

7.2.2 Líneas de investigación futuras

Las líneas de investigación futuras en relación con la junta T-bolt son muy variadas, tanto por lo que se refiere a la optimización y rediseño de las juntas utilizadas en la raíz de las palas de aerogeneradores como a las posibilidades de extensión de su uso a otras aplicaciones.

Como ya se ha comentado en el apartado anterior, desde el punto de vista de la rotura estática del laminado, existe un amplio margen de optimización de la junta T-bolt mediante la reducción del volumen de laminado necesario. Sin embargo, para que esta optimización pueda llevarse a cabo resulta totalmente necesario mejorar el conocimiento que se tiene sobre la degradación a largo plazo de las propiedades del laminado, tanto por efecto de la fatiga como por las condiciones ambientales, por lo que una línea de investigación futura clara consiste en la monitorización del comportamiento a largo plazo de las uniones instaladas en estructuras reales. Para ello pueden resultar de gran interés nuevas técnicas de *Structural Health Monitoring*, como la utilización de sensores de deformación de fibra óptica embebidos en el interior del laminado. Naturalmente, todo este proceso de monitorización deberá acompañarse de un desarrollo de modelos de degradación del material (Chen, 2001) y de técnicas experimentales de laboratorio capaces reproducir los procesos reales en una escala temporal reducida.

Otra manera más directa de abordar el problema de la optimización del material, en la que ya se está trabajando, consiste en la optimización del material mediante la sustitución de la parte central del laminado por un material de bajo coste, lo cual es especialmente importante cuando se utiliza fibra de carbono como material estructural, debido a su elevado coste económico. En este sentido se ha colaborado con la empresa *MTorres* en el diseño de una unión pala - buje a base de T-bolts para una pala de 35 m en la que se combina el laminado estructural básico de fibra de carbono con un núcleo de fibra de vidrio. Este diseño se ha utilizado en una pala que actualmente se encuentra en fase de prueba. Otras posibilidades incluyen la utilización de maderas o espumas poliméricas. La utilización de un núcleo distinto al material estructural principal, en laminados de gran espesor, tiene la ventaja adicional de facilitar el proceso de curado en distintas fases. De esta manera se evitarían las excesivas temperaturas que se alcanzan al curar en una sola fase un laminado de gran espesor, que pueden producir variaciones muy importantes en las características finales del laminado o incluso llegar a imposibilitar el proceso de curado.

También resulta interesante la posibilidad de mejorar la eficiencia de la junta mediante la mejora de la orientación de las fibras (Li *et al.*, 2002b) o bien mediante la introducción de refuerzos (Tse *et al.*, 2002).

Desde un punto de vista más básico es posible también mejorar la modelización de la T-bolt, incluyendo en el modelo el fallo progresivo del material, la influencia de los esfuerzos combinados, los esfuerzos interlaminares, la predicción del inicio de las delaminaciones (Chen *et al.*, 1999) y las inestabilidades de las fibras cargadas en compresión (Park, 2001; Vangrimde y Boukhili, 2002). Uno de los puntos críticos para la mejora general de los modelos de juntas mecánicas en materiales compuestos está en el estudio y desarrollo de criterios de fractura fiables y que contemplen de forma correcta los distintos mecanismos de inicio y propagación del fallo (Puck, 1996; París, 2001; Li *et al.*, 2002a)

Dentro de la extensión del campo de utilización de la T-bolt, una línea sobre la que ya se han realizado algunos estudios (Mayugo *et al.*, 1999) consiste en la utilización de juntas T-bolt modificadas para la unión a tope de materiales compuestos gruesos. Este tema tiene un interés creciente para el desarrollo de álabes de turbinas de gran tamaño, que deberán forzosamente fabricarse en dos piezas para, entre otras cosas, facilitar su transporte.

Otras aplicaciones de interés son todas aquellas en las que deban unirse piezas de gran tamaño realizadas en laminados de matriz polimérica y que deban unirse a partes metálicas. En este sentido cabe comentar los esfuerzos que se están realizando en todo el mundo para incrementar la utilización de materiales compuestos en partes estructurales de aeronaves comerciales. Un ejemplo claro de este interés es el proyecto europeo TANGO (*The Technology Application to the Near-Term Business Goals and Objectives of the Aerospace Industry*) que se propone como objetivo conseguir una reducción del 20% tanto en el peso como en el coste de la estructura de aviones comerciales de pasajeros, mediante el rediseño de algunas de las estructuras principales de la aeronave, que forzosamente comportará la utilización de juntas estructurales entre materiales metálicos y compuestos.

7.3 Conclusiones finales

A modo de resumen podemos decir que se ha cumplido el objetivo de realizar una primera caracterización del comportamiento mecánico de las uniones T-bolt mediante la combinación de modelos numéricos y ensayos experimentales. El desarrollo de las investigaciones ha exigido la utilización de un gran número de técnicas distintas, tanto a nivel de modelización como experimental, lo que ha supuesto un reto y una oportunidad de aprendizaje muy importante. A nivel de resultados concretos se ha demostrado la posibilidad de realizar una predicción del fallo del laminado, tanto en tensión neta como en compresión local, a partir de ensayos realizados con laminados de reducido espesor con agujeros cargados. Las colaboraciones con diversos fabricantes del sector eólico ha permitido aplicar los conocimientos adquiridos a diseños reales de juntas, que se encuentran actualmente en servicio con resultados satisfactorios. Algunas de las líneas de futuro indicadas ya se han aplicado a estos diseños y están previstos nuevos desarrollos en un futuro próximo.