

Capítulo 2

Uniones mecánicas en materiales compuestos

2.1 Introducción

Son muy pocos los trabajos publicados que hacen referencia a las juntas tipo T-Bolt y, en la mayor parte de los casos, se trata de trabajos en los que la junta T-bolt se trata juntamente con otras soluciones para la raíz de la pala. Dentro de este tipo de artículos destaca la revisión del estado del arte de la unión pala raíz realizada por Sandberg (1988) y varios capítulos del libro *Design of composite structures against fatigue: applications to wind turbine blades* (Vinckier y Sys, 1996; Laméris, 1996; Kensche y Schultes, 1996). Otro estudio, algo más reciente, en el que se hace referencia a este tipo de unión es el de Frese y Dalhoff (2000). Por lo que se refiere a trabajos específicos sobre la unión T-bolt, se pueden citar dos trabajos publicados en alemán a principios de la década de los 90 (Kensche, 1991 y Winkelmann, 1992), parte de cuyos resultados aparecen en Kensche y Schultes (1996), dos trabajos realizados por el grupo de investigación AMADE de la *Universitat de Girona* en colaboración con la empresa holandesa *Aerpac B.V.* (Scherer *et al.*, 1999 y Mayugo *et al.*, 1999), otros dos realizados por el mismo grupo en colaboración con el fabricante *MTorres Diseños Industriales S. A.* (Martínez *et al.* (2001a) y Martínez *et al.* (2001b)) y un estudio disponible en la página web del fabricante de aerogeneradores *Dewind* (Osthorst *et al.*, 2001). También cabe incluir dentro de esta categoría la ponencia de Pérez y Arias (1997) presentada en el II congreso de AEMAC, que está dedicada al estudio de una junta que, aunque no es exactamente T-Bolt, presenta ciertas similitudes con la misma.

Esta situación, contrasta notablemente con el ingente número de trabajos publicados sobre uniones a solape en materiales compuestos. Existen diversas razones que justifican este desequilibrio. En primer lugar, el uso de uniones a solape se encuentra mucho más extendido y tiene un rango de aplicaciones más amplio. En segundo lugar, este tipo de juntas presentan una geometría relativamente más sencilla, por lo que son más aptas que las T-Bolt para el desarrollo de la teoría básica relacionada con las juntas mecánicas en materiales compuestos. Por último, las uniones a solape, con materiales de espesores reducidos, son muy utilizadas en la industria aeronáutica que, como es sabido, dedica gran cantidad de recursos a la investigación.

Dadas las circunstancias, se ha tomado como base fundamental de conocimiento para el desarrollo de la tesis, no sólo los artículos dedicados a las uniones tipo T-Bolt en particular, sino también los dedicados a juntas mecánicas en materiales compuestos en general, y especialmente los dedicados a juntas a solape, ya que es de donde procede la mayor parte de la información disponible.

A continuación se presentan lo que se consideran los resultados más representativos de los trabajos

consultados sobre el tema, tanto en lo que se refiere a descripción de la fenomenología, como a los modelos propuestos.

2.2 Fenomenología

La determinación de la carga máxima que es capaz de transmitir un pivote introducido en el interior de un agujero practicado en una placa de material compuesto (figura 2.1) presenta tal complejidad que, pese a ser objeto de intensa investigación desde mediados de la década de los 70, todavía no se ha podido dar una respuesta definitiva a la cuestión.

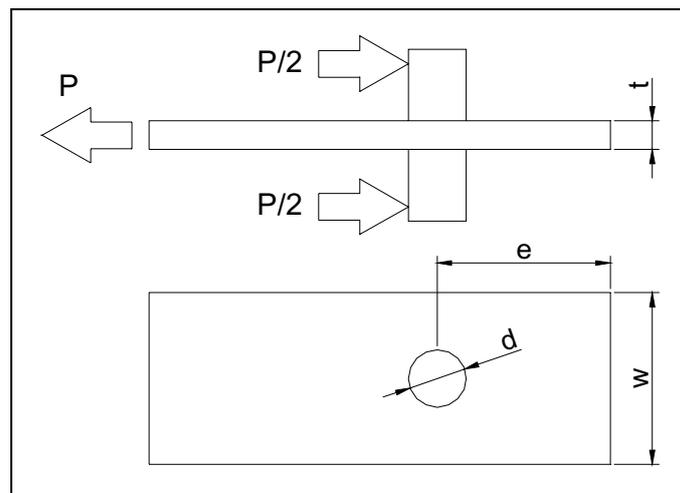


Figura 2.1: Laminado con carga de pivote

Esta complejidad se deriva de la naturaleza de los materiales compuestos de fibra larga:

- No isótropos (a lo sumo pueden considerarse materiales ortótropos, bajo ciertas circunstancias)
- No homogéneos
- Componentes que no presentan plasticidad

Y de la geometría del problema:

- Problema de contacto
- Elevada concentración de esfuerzos

De las tres características del material, la heterogeneidad es la que presenta mayores problemas, ya que no es posible predecir la rotura del mismo por un simple y único mecanismo de fallo, sino que tienen que tenerse en cuenta múltiples mecanismos (Oplinger, 1996; Camanho y Matthews, 1997), dependiendo de la dirección de la carga, la secuencia de apilado de láminas y la naturaleza de cada uno de los componentes y de su interfase.

La predicción de la carga de rotura es pues una cuestión delicada bajo cualquier circunstancia, pero adquiere mayor complejidad cuando existen gradientes importantes de tensión, ya que entonces la relajación de esfuerzos debido a la aparición de fallos locales del material cobra una mayor importancia (Kretsis y Matthews, 1985; Camanho *et al.*, 1998).

La concentración de esfuerzos, que aparece siempre en este tipo de elementos, se ve agravada por la naturaleza ortótropa del material, que puede llegar a multiplicar por 2 (Crews *et al.*, 1981) los factores de concentración de esfuerzos que se obtendrían, para la misma geometría, con materiales isótropos.

Es interesante observar también que, mientras que en el diseño de juntas entre materiales dúctiles como el acero o el aluminio tiende a despreciarse la concentración de esfuerzos (Shigley y Mitchell, 1989), a causa de la relajación inducida por los fenómenos de fluencia, en el caso de los materiales compuestos de matriz polimérica y refuerzos de fibra larga, esta relajación no puede producirse debido a la falta de plasticidad de sus componentes.

2.2.1 Modos de fallo

Consideraremos 3 tipos de rotura (del elemento): Tensión, Aplastamiento y Cortante (figura 2.2), ya que, aunque en ocasiones se consideran otros tipos, estos no tienen especial relevancia para el caso de la T-Bolt.

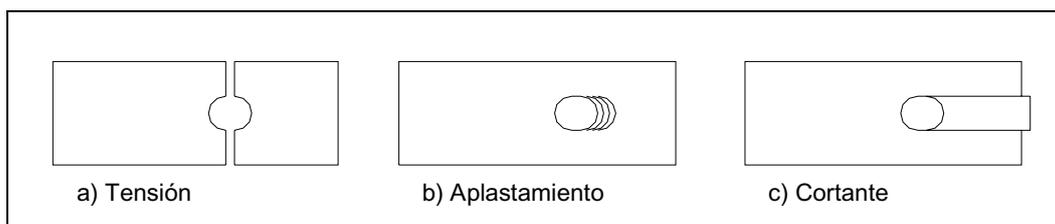


Figura 2.2: Modos de fractura

A cada uno de estos modos de fallo se le suele asociar un plano de referencia (figura 2.3) cuya distribución de esfuerzos se utiliza para la predicción de la carga de rotura¹.

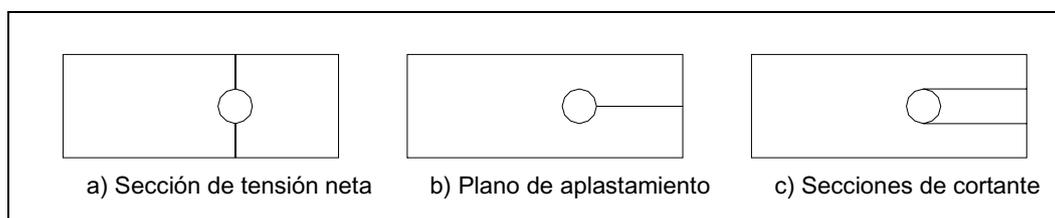


Figura 2.3: Planos de fallo

Cada tipo de fractura presenta sus propias particularidades que intentaremos resumir a continuación.

¹Aunque estos planos de referencia no son imprescindibles cuando se utilizan métodos basados en la fractura progresiva para la predicción del fallo, sí se utilizan en la mayor parte de los métodos utilizados habitualmente para el diseño de juntas.

2.2.1.1 Tensión

Las fracturas a tensión se producen en la sección representada en la figura 2.3a y se presentan de forma catastrófica, ya que no se puede apreciar la aparición de daño en la pieza hasta cargas muy próximas a la de rotura y, después del fallo de la junta, ésta no puede soportar ninguna carga apreciable.

El compuesto falla por fractura a tracción de las fibras. Analizando las probetas en el laboratorio, es posible apreciar la aparición de daño en la probeta para cargas del 90% de la de rotura (Camanho, 1999). En los alrededores de la zona de máxima concentración de esfuerzos aparecen pequeñas grietas en la matriz, perpendiculares a la carga aplicada.

También se pueden apreciar delaminaciones entre las distintas capas de material y desprendimiento de las fibras respecto de la matriz (*debonding*) (Camanho *et al.*, 1998). En este caso, el daño asociado a la matriz no tiene una influencia negativa en la resistencia del elemento, ya que su efecto consiste en una redistribución de la carga desde las fibras más cargadas a las menos cargadas (Hart-Smith, 1978, 1986), de forma similar al efecto de la fluencia en materiales metálicos, aunque mucho menos pronunciada. Por este motivo, aunque no se puede despreciar la concentración de tensiones presente en el laminado tampoco es posible comparar la tensión máxima obtenida en un análisis lineal de esfuerzos, con el esfuerzo máximo de rotura del material, ya que en este caso estaríamos sobredimensionando el elemento.

Este modo de fractura se produce para valores altos de la relación D/w dependiendo el valor de transición a este modo de las propiedades de cada laminado (Hart-Smith, 1978).

Un fenómeno remarcable consiste en que los esfuerzos medios a la rotura, que se obtienen en el área de tensión neta, son apreciablemente mayores para agujeros de tamaño pequeño que para agujeros grandes (Oplinger, 1996). Esto se explica, habitualmente, por el hecho de que el tamaño de la zona en que se produce la relajación de tensiones depende exclusivamente del laminado en cuestión y no del tamaño del agujero. Por este motivo, su efecto es mucho más pronunciado para agujeros pequeños, ya que el pico de tensión puede llegar virtualmente a desaparecer. En cambio, de acuerdo con Crews (1984), el efecto de relajación de esfuerzos es prácticamente despreciable para agujeros de más de 25 mm de diámetro.

2.2.1.2 Aplastamiento

Este tipo de fractura es el que se presenta de modo menos catastrófico, ya que, después del fallo de la junta, esta puede normalmente seguir soportando una carga importante (Collings, 1977; Kretsis y Matthews, 1985).

En este caso se acepta que el fallo se inicia por compresión en la matriz, desarrollándose a continuación grietas y delaminaciones, y finalmente termina con el fallo a compresión y pandeo de las fibras (Camanho *et al.*, 1998).

Los primeros indicios de daño se pueden apreciar claramente a partir del 80% de la carga de rotura, con la aparición de grietas en la matriz que se propagan a 45° de la dirección de la carga y a través del laminado (figura 2.4²).

Del modo en que se propaga el daño se deduce que éste es un fenómeno muy influenciado por el cortante interlaminar que, al ser un esfuerzo fuera del plano del laminado, no se contempla cuando se realizan análisis según la teoría clásica de laminados.

²Figura tomada de Camanho (1999)

Un parámetro que influye notablemente en el comportamiento de las juntas frente a la rotura por aplastamiento es el esfuerzo transversal de compresión que se produce entre las tuercas en uniones reales (figura 2.5) . Este esfuerzo evita en gran medida la aparición de inestabilidades en las fibras, aumentando notablemente la resistencia al aplastamiento de la junta (Wang *et al.*, 1996).

Siempre que se utilicen laminados apropiados (casi-isótropos) y una restricción lateral adecuada, se puede llegar a valores de esfuerzo de aplastamiento medios $P/(dt)$ no muy lejanos a la resistencia a compresión del laminado (Hart-Smith, 1978), indicando una relajación de las concentraciones de esfuerzos claramente superior a la que se obtiene para la rotura a tracción.

2.2.1.3 Cortante

Muchos autores (e.g. Hart-Smith, Matthews, Collings) consideran la rotura a cortante (figura 2.2c) como un caso especial de rotura por aplastamiento. Ello no obstante, presenta algunas diferencias con esta última: en primer lugar, este modo se presenta de manera repentina y catastrófica. Además, no se puede hablar de forma clara de un valor de resistencia al cortante, ya que, para materiales bien diseñados, es muy difícil provocar este tipo de rotura. En cambio, en el caso de materiales con excesiva ortotropía, la rotura se presenta para casi cualquier relación e/d , no dependiendo la carga máxima aplicable de la distancia al borde libre e (Hart-Smith, 1978).

De acuerdo con Camanho (1999) los primeros síntomas de daño pueden apreciarse alrededor del 90% de la carga máxima, apreciándose la aparición de grietas en la matriz a 45° respecto de la dirección de la carga. En este caso, a diferencia del caso de aplastamiento, las grietas no se encuentran en la dirección del espesor del laminado, sino en la dirección del plano de la lámina.

En general, se tiende a utilizar diseños que presenten una rotura por aplastamiento antes que por cortante, ya que esta primera se considera más conveniente. Aparte de ser menos catastrófica, para forzar una rotura por cortante nos veríamos obligados a utilizar juntas mucho menos eficientes que las que presentan primero la rotura por aplastamiento (asumiendo que se utiliza un material correctamente diseñado).

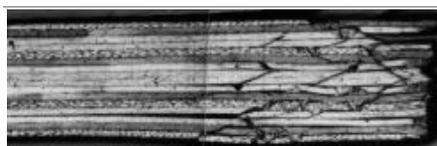


Figura 2.4: Rotura por aplastamiento

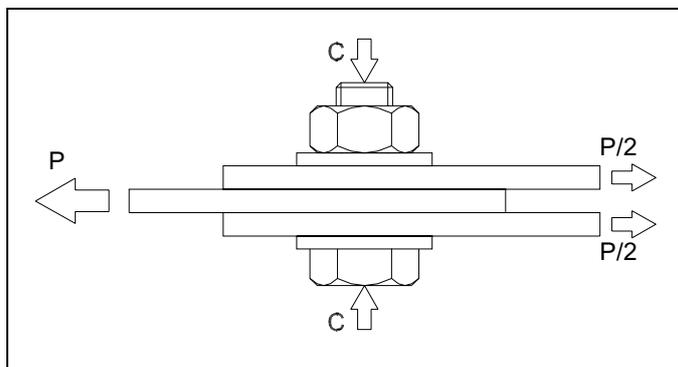


Figura 2.5: Compresión lateral

En juntas a solape, las medidas a adoptar para evitar las roturas por cortante son relativamente sencillas: se deben utilizar materiales casi-isótropos (Hart-Smith recomienda utilizar proporciones de no menos de 1/8 ni más de 3/8 en cada una de las direcciones típicas: 0° , $+45^\circ$, -45° , 90°) y debe observarse una distancia mínima $e \geq 3d$ (Hart-Smith, 1978).

2.2.2 Eficiencia de las uniones en materiales compuestos

Los distintos modos de fallo llevan asociados, pues, la aparición de pequeñas grietas, delaminaciones y otros fenómenos que hacen que, si bien no es posible considerar que existe una relajación completa de las concentraciones de tensiones, tampoco es posible representar el comportamiento de las juntas en materiales compuestos como si éstos fueran materiales frágiles, ya que, a pesar de la ausencia de fluencia, existe una cierta relajación de tensiones que dependerá del tipo de laminado utilizado y de las condiciones geométricas del problema.

La figura 2.6, trazada a partir de las fórmulas presentadas en Hart-Smith (1986), ilustra este último punto. En ella se aprecia lo que, según este autor, sería el comportamiento de un material compuesto típico a base de fibra de carbono y epoxy, comparado con un comportamiento totalmente frágil (línea continua) o bien idealmente dúctil (líneas punteadas). Lo que se representa es la eficacia de la junta en función de la relación diámetro del pivote / anchura del espécimen. La eficacia se expresa como la relación entre la carga máxima que puede soportar la junta y la carga que soportaría el material en bruto. En este ejemplo se asume que la resistencia al aplastamiento del material es el doble que su resistencia a tracción.

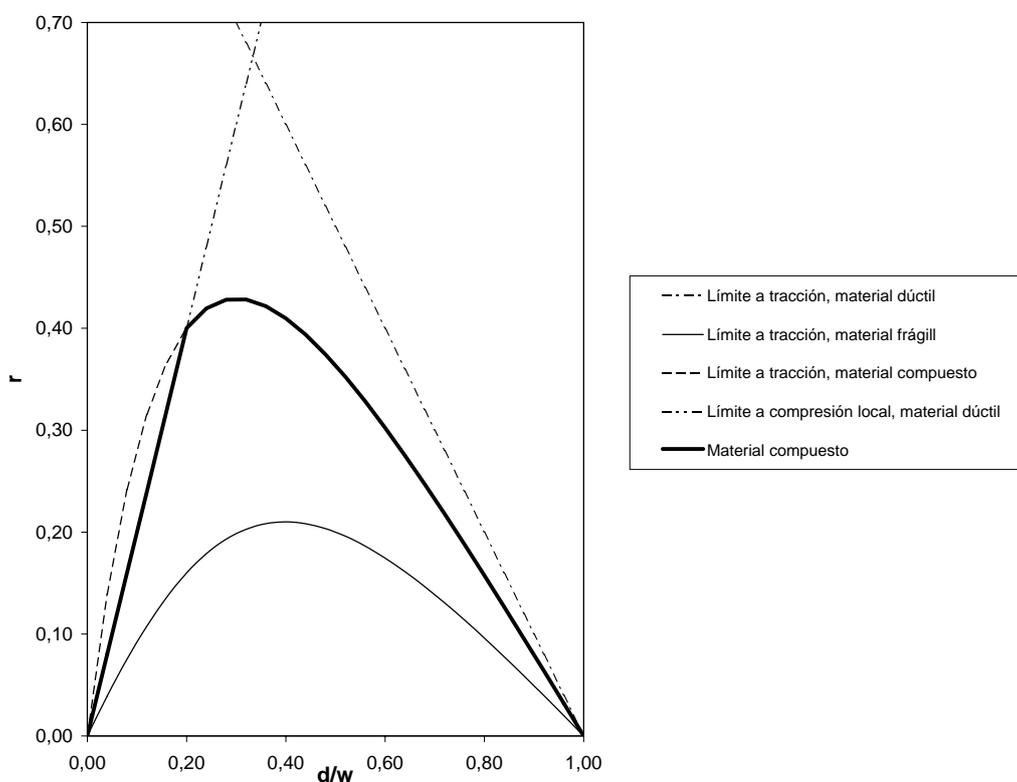


Figura 2.6: Estados límite en juntas de materiales compuestos

Como se puede observar en la gráfica, mientras que en una junta típica en aluminio se puede llegar

a eficiencias del orden del 70 % e incluso del 80 %, en materiales compuestos raramente se puede superar el 40 %.

Esta desventaja de las juntas en materiales compuestos, para cargas estáticas, se ve compensada en gran medida, según el mismo autor, por el hecho de que éstas no sufren apenas degradación de sus propiedades frente a la fatiga³. De hecho, se comprueba que la resistencia residual puede incluso experimentar un incremento durante la aplicación de ciclos de carga tensión tensión. Esto se justifica a partir de dos puntos: a) al contrario que en materiales dúctiles, en materiales compuestos ya se han tenido en cuenta, para el cálculo estático, las concentraciones de tensiones; b) el efecto que tienen las cargas de fatiga (de valor muy inferior a las que producirían la rotura estática) es el de promover la aparición de pequeñas delaminaciones y grietas que son precisamente los responsables de la relajación de tensiones en materiales compuestos.

2.3 Modelos

A partir de lo dicho en el apartado anterior, se deducen las siguientes características que condicionan el tipo de modelos a utilizar para la predicción de la resistencia de la junta:

- Todos los modos de fractura presentados se ven influidos, en mayor o menor medida, por la concentración de esfuerzos presente en la zona de contacto.
- Aunque no se presenta el fenómeno de la fluencia, existe una cierta relajación de los picos de tensión debido a la aparición de pequeñas delaminaciones y/o desprendimientos fibra / matriz.
- Los mecanismos reales que determinan esta relajación de esfuerzos son muy difíciles de modelizar a partir de modelos macroscópicos, ya que incluyen no linealidades a escalas muy pequeñas (como el caso del pandeo de las fibras), e interacciones entre los distintos componentes del material.
- En la fractura por aplastamiento tienen gran importancia los esfuerzos fuera del plano del laminado. Estos esfuerzos dependen fuertemente de la secuencia de apilado de capas. (Smith y Pascoe, 1986; Wang *et al.*, 1996)

Para abordar estos problemas se han propuesto multitud de modelos, que podemos sin embargo agrupar dentro de 4 grandes categorías:

- Aplicación directa de algún criterio de fractura
- Modelos basados en la mecánica de la fractura
- Modelos basados en la utilización de dos parámetros
- Modelos de fractura progresiva

En los siguientes apartados se describen cada una de estas categorías.

³Esto será cierto siempre que no exista juego entre el pivote y el material compuesto y, al mismo tiempo, se apliquen cargas con cambio de signo, ya que en este caso se produciría una rápida destrucción de la junta.

2.3.1 Aplicación directa de algún criterio de fractura

Esta categoría la integran los modelos más sencillos. En ellos se intenta deducir la carga máxima que soporta la junta a partir de la aplicación de un criterio de fallo, ya sea éste a nivel de lámina o de laminado, a partir de los esfuerzos máximos obtenidos mediante un análisis lineal. El problema principal que presenta esta aproximación consiste en que no tiene en cuenta la relajación de esfuerzos previa al fallo y, por tanto, se obtienen predicciones excesivamente conservadoras. Como ejemplos se puede citar a Waszczak y Cruse (1971) o Soni (1981).

2.3.2 Modelos basados en la mecánica de la fractura

Los modelos de este tipo, en los que se asume la presencia de una grieta en las proximidades del agujero, ofrecen una excelente correlación con los resultados experimentales, pero tienen el gran inconveniente de precisar gran número de complicados ensayos para la apropiada caracterización del material. Ejemplos de este tipo de modelos son los trabajos de Soutis (1992), de Schulz *et al.* (1995) y el de Hollmann (1996).

2.3.3 Modelos empíricos basados en la utilización de dos parámetros

Los modelos basados en dos parámetros son tal vez los que se encuentran más extendidos, debido a que combinan la simplicidad con un nivel de precisión aceptable en muchos casos.

Se encuentran principalmente dos versiones, ambas formuladas inicialmente en Whitney y Nuismer (1974). En la primera versión (*Point Stress*) se asume que el fallo se producirá cuando se verifique un determinado criterio de fallo en uno o más puntos preestablecidos, definidos por una distancia d_0 desde el borde del agujero. En la segunda (*Mean Stress*) el criterio de fallo se deberá cumplir para el valor medio de las tensiones a lo largo de una zona, determinada normalmente por una distancia a_0 también desde el borde del agujero.

Estas distancias se toman como una propiedad del material, con lo que se consigue reproducir el efecto del tamaño absoluto del agujero que se comentó en el apartado anterior.

Algunos autores como Nuismer y Labor (1979a,b) o Agarwal (1980) miden las distancias (a_0 y/o d_0) a lo largo de distintas secciones que se asocian a uno u otro de los modos de fallo, por lo que en realidad se tendrán tantas distancias características como secciones defina el autor.

Otros autores como Chang *et al.* (1982, 1984) definen una curva sobre la que se verificará el criterio de fallo. La curva se define a partir de las distancias características para compresión y tensión simple.

Finalmente, autores como Eriksson (1986) postulan que el criterio de fallo deberá comprobarse, para cada lámina, en el punto donde ésta sea tangente al círculo $D/2 + d_0$.

El coste computacional asociado a este tipo de modelos es moderado, lo que hace que se hayan utilizado ampliamente con fines de diseño.

Como inconvenientes cabe citar que la utilización de este tipo de criterios implica la realización de algunas medidas experimentales adicionales a las necesarias habitualmente para caracterizar el material. Si bien éstas no presentan una elevada complejidad, los resultados obtenidos son muy sensibles a los valores de las distancias características, por lo que estas últimas deben determinarse con una elevada precisión.

En cuanto al ajuste a los resultados experimentales se alcanzan precisiones elevadas (5-10%) siempre que se trabaje con laminados con buen comportamiento. Habitualmente se obtienen mejores resultados para los fallos a tracción que por aplastamiento. Este hecho, común a todos los modelos revisados, se debe a la mayor complejidad de los estados de esfuerzos en la zona de aplastamiento y a que las cargas de compresión presentan modos de fallo complejos, que incluyen el pandeo de fibras y delaminaciones, para los cuales no se han establecido todavía criterios de fallo fiables (París, 2001).

2.3.4 Modelos de fractura progresiva

Este tipo de modelos están teniendo un fuerte avance en los últimos años, debido principalmente al incremento experimentado en la capacidad de cálculo de los ordenadores.

La principal diferencia con los modelos presentados hasta este punto consiste en que la evaluación de los estados de esfuerzos y la aplicación del criterio de fallo no se hacen de forma independiente, sino que se intenta introducir, en el modelo de elementos finitos, las no linealidades debidas a la progresiva degradación de las propiedades del material.

Como inconvenientes de este grupo de modelos deben citarse, por un lado, el elevado tiempo de computación que requiere y, por otro, la elevada dificultad que presenta la modelización de determinados fenómenos de fractura en la microescala, como las delaminaciones (Camanho y Matthews, 1999; Chen *et al.*, 1999) o el pandeo de las fibras (Daniel *et al.*, 1996), así como la determinación de la ley de degradación de propiedades propia de cada micromecanismo de fallo (Laws *et al.*, 1983; Tan y Nuismer, 1989; Tserpes *et al.*, 2002).

Por el contrario, estos modelos presentan las virtudes de proporcionar información sobre la manera en que se propaga el daño, y del efecto de cargas inferiores a la de rotura, y al mismo tiempo no precisa de ensayos nuevos cada vez que se diseña un nuevo laminado sobre la misma base de material.

Algunos de los trabajos considerados dentro de esta categoría son: Chang y Chang (1987b,a); Nuismer y Tan (1988); Chang *et al.* (1991); Tan (1991); Chang y Lessard (1991); Lo *et al.* (1993); Tan y Perez (1993); Shahid y Chang (1995); Shokrieh *et al.* (1996); Hung y Chang (1996b,a); Nguyen (1997); Kim *et al.* (1998); Chen *et al.* (1999); Sawicki (1999); Camanho y Matthews (2000); Maa y Cheng (2002)

2.4 Tendencias actuales

Como ya se ha dicho, todavía queda mucho camino por recorrer en el tema de la modelización de juntas mecánicas en materiales compuestos. Durante los últimos años se ha mantenido una importante actividad en este campo. Esta actividad se ha concentrado especialmente en los puntos que se describen a continuación.

2.4.1 Predicción de los estados de tensiones tridimensionales

Hasta mediados de la década de los 90, prácticamente todos los estudios sobre los estados de esfuerzos en juntas mecánicas, tanto si se trataba de métodos analíticos (de Jong, 1977, 1987), como

numéricos (Crews *et al.*, 1981; Naik y Crews, 1985; Ramamurthy, 1989; Lessard y Shokrieh, 1995), consideraban únicamente los esfuerzos en el plano del laminado. Esto impone importantes restricciones a la aplicación de estos métodos a la predicción del fallo para modos de rotura como el aplastamiento local, en los que los esfuerzos transversales parecen jugar un papel muy importante.

Es por ello que una de las tendencias actuales dentro de la modelización de juntas mecánicas consiste en el desarrollo de modelos que permitan la predicción de los estados de esfuerzos tridimensionales, introduciendo además en el modelo los fenómenos de contacto y las no linealidades propias del material, tanto elásticas como debidas a la degradación de propiedades.

La mayoría de los trabajos desarrollados en este campo se basa en la utilización del método de los elementos finitos: Chen *et al.* (1995); Shokrieh y Lessard (1996); Ireman (1998); Xiong y Bedair (1999); Yunhua y Eriksson (1999); Vangrimde y Boukhili (2002); Tse *et al.* (2002); Tserpes *et al.* (2002). No obstante, debido al enorme coste computacional que supone la utilización de este método, algunos autores proponen métodos alternativos, como la utilización de aproximaciones basadas en curvas Spline (Iarve, 1996, 1997), aproximaciones por el método de los elementos de contorno Pan *et al.* (2001), e incluso métodos analíticos como en el caso de Xiong (1998) y Xiong y Bedair (1999).

2.4.2 Estudio de los distintos modos de fallo

Otra de las líneas abiertas consiste en el estudio de los distintos mecanismos de fallo, así como la formulación de criterios capaces de predecir su aparición. Especialmente se está trabajando en la caracterización del fallo por compresión local (Wang *et al.*, 1996), lo cual incluye la aparición de inestabilidades en las fibras (Lessard y Chang, 1991; Daniel *et al.*, 1996) y la aparición de delaminaciones (Camanho y Matthews, 1999; Chen *et al.*, 1999). El objetivo de este tipo de estudios debe ser la caracterización tanto del mecanismo de aparición y propagación de un determinado modo de fallo, como los efectos sobre las propiedades del material afectado.

Otra línea que se está desarrollando es la formulación de criterios de fallo que permitan la predicción ajustada del fallo local en situaciones de esfuerzos bi-axiales y tri-axiales. Esta línea, aunque de ámbito más general, tiene una relación muy directa con la posibilidad de desarrollar modelos de fractura progresiva con una elevada capacidad de predicción. La tendencia actual consiste en abandonar los modelos basados únicamente en las propiedades macroscópicas del material como el conocido criterio de Tsai y Wu (1971) e intentar formular criterios que tengan en cuenta cuáles son los mecanismos reales de fallo a nivel microscópico, del tipo de los de Hashin y Rotem (1973), Hashin (1980) o Puck (1996).

2.4.3 Elaboración de modelos

La tendencia general consiste en la elaboración de modelos de fractura progresiva, como el desarrollado por P. Camanho y F.L. Matthews en el transcurso de la tesis doctoral del primero (Camanho y Matthews, 1997; Camanho *et al.*, 1998; Camanho y Matthews, 1999; Camanho, 1999; Camanho y Matthews, 2000). Éste es un modelo tridimensional de fractura progresiva basado principalmente en el modelo bidimensional desarrollado por Tan y sus colaboradores (Nuismer y Tan, 1988; Tan y Nuismer, 1989; Tan, 1991; Tan y Perez, 1993). En él se recogen gran parte de los avances realizados hasta la fecha en las dos líneas de investigación comentadas anteriormente. Otros ejemplos de este tipo de modelos son el desarrollado por Maa y Cheng (2002) o el estudio de Tserpes *et al.* (2002) en

el que se ensayan distintos criterios de fallo y distintas leyes de degradación del material sobre un mismo algoritmo básico.

También conviene comentar que, pese a que todo apunta a que en el futuro se extiendan cada vez más los modelos de fractura progresiva, éstos siguen teniendo en la actualidad grandes limitaciones, tanto por lo que se refiere a la potencia de cálculo necesaria como por las incertidumbres asociadas a la caracterización precisa del comportamiento del material. Por este motivo, algunos autores como Hollmann (1996)⁴ y Ireman (Ireman *et al.*, 1993; Ireman y Eriksson, 1997; Ireman, 1998), siguen optando por nuevas versiones de modelos de dos parámetros, modificados para poder abarcar geometrías y situaciones de carga más generales.

⁴Este trabajo combina aspectos de los métodos de dos parámetros y de la mecánica de la fractura, por lo que en un apartado anterior nos habíamos referido al mismo como un método relacionado con esta última temática.