

Capítulo 6

Consideraciones sobre la predicción del fallo

6.1 Introducción

Hasta ahora se han presentado, por un lado, las cargas de rotura de algunas probetas obtenidas experimentalmente y, por otro lado, una estimación de los estados de esfuerzos presentes en el interior de una junta estándar, realizada mediante métodos numéricos. Idealmente, el siguiente paso, sería la predicción de las cargas de rotura a partir de los estados de los esfuerzos obtenidos numéricamente.

Por desgracia, como ya se ha comentado en capítulos anteriores, en el campo de los materiales compuestos, no se ha desarrollado todavía una teoría general que permita realizar este paso en cualquier situación y para cualquier geometría, por lo que para cada caso particular (juntas mecánicas, laminados finos / gruesos, etc.) se han desarrollado una serie de teorías parciales y, a menudo, con una componente empírica muy importante, que permiten obtener diseños fiables y razonablemente ajustados.

El desarrollar una teoría de este tipo para el caso de la unión T-bolt, queda totalmente fuera del alcance de la presente Tesis. No obstante, se ha comprobado que es posible obtener estimaciones bastante fiables de los esfuerzos admisibles en la unión T-bolt, utilizando, como datos de partida, ensayos realizados en juntas a solape sin apriete lateral y los esfuerzos obtenidos mediante un modelo de elementos finitos, como el utilizado para la junta estándar. Este procedimiento presenta la ventaja que, aunque se requieren ensayos experimentales, éstos son mucho más sencillos de preparar y realizar que los ensayos sobre juntas T-bolt propiamente dichas, ya que los laminados utilizados son de menor espesor, con lo que las cargas de trabajo también son mucho más reducidas y, además, la geometría de las probetas es mucho más simple.

En los apartados siguientes se aplica el modelo de elementos finitos descrito en el capítulo 4 a las distintas probetas ensayadas, aplicando, en cada caso, la carga de rotura de la probeta.

6.2 Predicción del fallo

6.2.1 Tensión neta

Para la realización del estudio se dispone de tres probetas distintas: C, N y MN, ensayadas en tensión neta, fabricadas en el material tipo M. Las características de estas probetas se pueden consultar en el capítulo 5, pero a modo de recordatorio diremos que las probetas tipo C están constituidas por

un laminado de unos 4.3 mm de espesor por 60 mm de anchura y 350 mm de largo, al que se ha practicado un agujero de 10 mm en su punto central. En este tipo de probeta la carga se introduce por sus extremos mediante las mordazas de la máquina de ensayos y el agujero no tiene ninguna inserción. Las probetas tipo N están formadas por un laminado de unos 9 mm de espesor, 50 mm de anchura y 350 mm de largo, al que se han realizado dos agujeros de 25 mm de diámetro a una distancia de 75 mm de ambos extremos, donde la carga se introduce en este caso mediante un cilindro de acero insertado en los agujeros. La geometría de las probetas tipo N correspondería a una junta a solape doble en la que no existiese ningún apriete lateral. Finalmente, las probetas tipo MN, están formadas por dos uniones tipo T-bolt colocadas en los extremos de un laminado de unos 37 mm de espesor por 48 mm de anchura y 300 mm de longitud; el agujero del bulón es de 30 mm y el del vástago de 16 mm.

Las resistencias medias (S_n) obtenidas para cada uno de estos tipos de probeta se pueden ver en la tabla 6.1. Se puede observar que, pese a las importantes diferencias geométricas y los distintos valores de carga máxima que presentan las distintas probetas, los valores de S_n son bastante similares entre si. La diferencias que presentan las probetas C y N con respecto al valor obtenido para la probeta MN son del 18% (tipo C) y del -7% (tipo N).

	C	N	MN
P_{max} (kN)	87	71	223
S_n (MPa)	385	304	326

Tabla 6.1: Valores de medios de resistencia en tensión neta

Como vemos comparando los valores de la tabla 6.1, sería posible realizar una primera estimación de la carga máxima que es capaz de soportar una unión T-bolt en tensión neta, a partir de los resultados obtenidos mediante una probeta tipo N. El siguiente paso en este estudio consiste en comparar las distribuciones de esfuerzos en la zona de la rotura en tensión neta de las distintas probetas.

Para ello se han realizado tres modelos de elementos finitos del tipo descrito en el capítulo 4, representando cada uno de los tipos de probeta. En la figura 6.1 se muestran detalles de los tres modelos en los que se indica la zona sobre la que se han medido los esfuerzos en cada uno de ellos.

En los tres casos se ha tomado el plano que, pasando por el eje del bulón, corta al punto de máximo esfuerzo σ_x . De todas formas, en los tres tipos de probeta la variación de los esfuerzos en la dirección del espesor en la zona de tensión neta es muy reducida, como puede verse en la figura 6.1d en la que se han representado los esfuerzos en la dirección X. Por ello, para simplificar la representación gráfica, la comparación se ha realizado únicamente con los valores de la línea paralela al plano del laminado que pasa por el máximo de esfuerzo (líneas A-B). Esta línea en las probetas tipo C y N pasa por el plano medio del laminado (plano de simetría del modelo), mientras que en el caso de la probeta tipo MN se encuentra situado en una profundidad de aproximadamente $t - d$ siendo t el espesor del laminado y d el diámetro del vástago.

Únicamente se han tomado en cuenta los valores de la componente σ_x , ya se observa que el fallo se produce en un plano perpendicular a la misma y además, como se veía en el análisis de la probeta estándar, en la zona de tensión neta, esta componente es un orden de magnitud superior a todas las demás.

En la figura 6.2 se observan los resultados obtenidos para cada una de las probetas C, N y MN. De forma parecida a lo que pasaba con los esfuerzos medios, se observa que las distribuciones de esfuerzos en las proximidades del agujero son prácticamente iguales en el caso de las probetas N y MN mientras que la probeta tipo C presenta un pico mucho más pronunciado. Esta diferencia, se

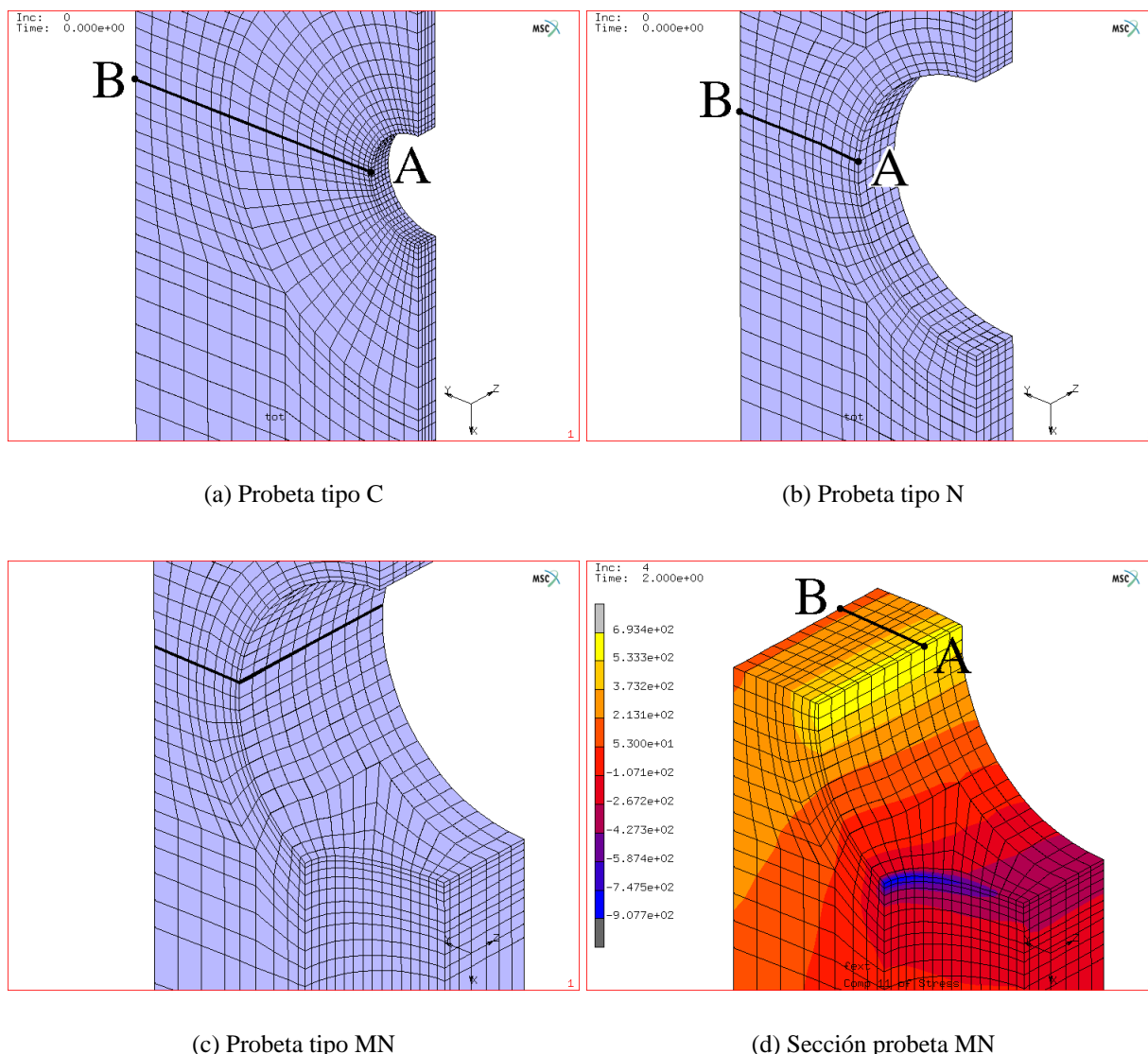


Figura 6.1: Modelos de las probetas tipo C, N y MN

debe, por una parte, a la distinta relación w/D que presenta esta probeta respecto de las otras dos y por otra a las distintas condiciones de carga de la probeta que implican una distribución distinta de los esfuerzos.

A pesar de la gran similitud que presentan las distribuciones de esfuerzos, si se intentase estimar la carga de rotura de la T-bolt a partir únicamente del esfuerzo máximo alcanzado, vemos que se obtendría un error de alrededor del 7%, similar al que obteníamos simplemente comparando los valores medios de esfuerzo. Esto no debe extrañarnos, ya que el valor de pico es un valor muy sensible tanto a factores dependientes del modelo numérico (como la calidad del mallado), como a factores relacionados con la fenomenología del contacto. Por este motivo, ya en 1974, Whitney y Nuismer desarrollaron el método de predicción basado en dos parámetros, denominado *Point Stress*, en el cual se supone que la junta alcanza su carga de rotura cuando el esfuerzo a una cierta distancia d_0 del borde del agujero supera el esfuerzo máximo a tracción del material. En nuestro caso la distancia d_0 es de 0.93 mm, como puede apreciarse en la figura 6.2 y, con mayor detalle, en la figura 6.3. Utilizando esta metodología para la estimación de la carga máxima admisible, se habría obtenido una precisión del 3.5%.

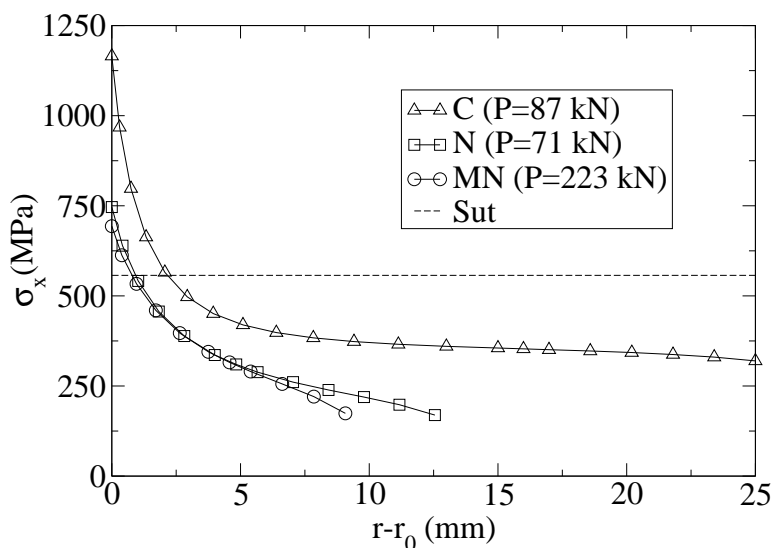


Figura 6.2: Tensión neta, probetas tipo C, N y MN

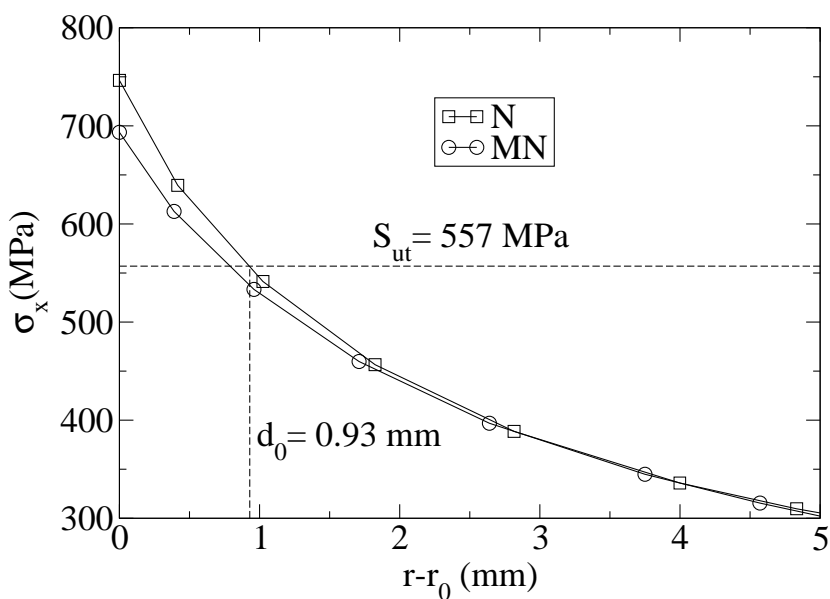


Figura 6.3: Distancia d_0

Finalmente, la metodología del *Point Stress* permite, en teoría, realizar predicciones para laminados de características similares al ensayo pero con cargas de rotura distintas. Aunque no se trata de un método muy fiable, ya que no existe ninguna teoría que determine en que casos es posible realizar esta generalización ni cuales son los errores máximos que puede producir, se puede utilizar como primera aproximación siempre que no se disponga de ensayos realizados con el mismo laminado de las juntas a diseñar.

En nuestro caso, disponemos de los resultados del ensayo de las probetas tipo AN que estaban forma-

das por el mismo tipo de fibra y matriz (fibra de vidrio y epoxy) y tenían una secuencia de apilado similar (con fibras a 0° , $\pm 45^\circ$ y 90°), pero que, sin embargo, presentaban propiedades mecánicas muy distintas a las de las probetas MN, debido principalmente a que poseían un contenido volumétrico de fibras muy inferior. Este tipo de probetas presentaron un valor medio de rotura en tensión neta S_b de 220 MPa, es decir un 33% inferior al de las probetas tipo MN. En la figura 6.4 se muestra la distribución de esfuerzos para la carga de rotura de esta probeta comparada con las dos anteriores (N y MN).

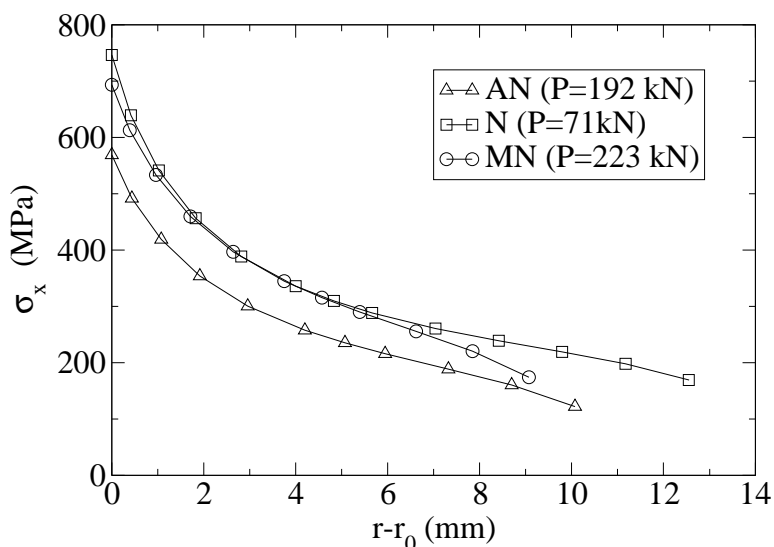


Figura 6.4: Tensión neta, probetas tipo N, MN y AN

A pesar de estas grandes diferencias, aplicando el método del *Point Stress* con el valor $d_0=0.93$ mm obtenido a partir de las probetas tipo N y una estimación de la resistencia a tracción del laminado tipo A¹: $S_{ut}=428$ MPa. Se obtiene una estimación de la carga de rotura con un error inferior al 2%, tal como puede apreciarse en el detalle de la figura 6.5.

6.2.1.1 Relación con las curvas de emisión sonora

Un aspecto a destacar y que deberá analizarse con más profundidad en el futuro, es el hecho de que, si se calculan los esfuerzos mediante el modelo de elementos finitos, para la carga a la que se produce el incremento de emisiones sonoras en los ensayos (P_0 en la figura 6.6a), el pico máximo de esfuerzo que se obtiene supera el esfuerzo máximo de rotura del laminado en alrededor de un 10%, tal como puede apreciarse en la figura 6.6b correspondiente a la probeta MN. Este hecho parece indicar que, pese a su simplicidad, el modelo de elementos finitos es capaz de predecir el inicio del fallo en tensión neta, con una precisión bastante aceptable, simplemente comparando el esfuerzo máximo obtenido con la resistencia a tracción del laminado.

Para la obtención de la figura 6.6b no se ha utilizado el valor P_0 mostrado en la figura 6.6a, que corresponde a la probeta MN3, sino que se ha utilizado la media de las 4 probetas MN cuyo valor

¹El valor de la resistencia del laminado ha sido estimado utilizando un criterio de máxima deformación admisible a nivel de lámina.

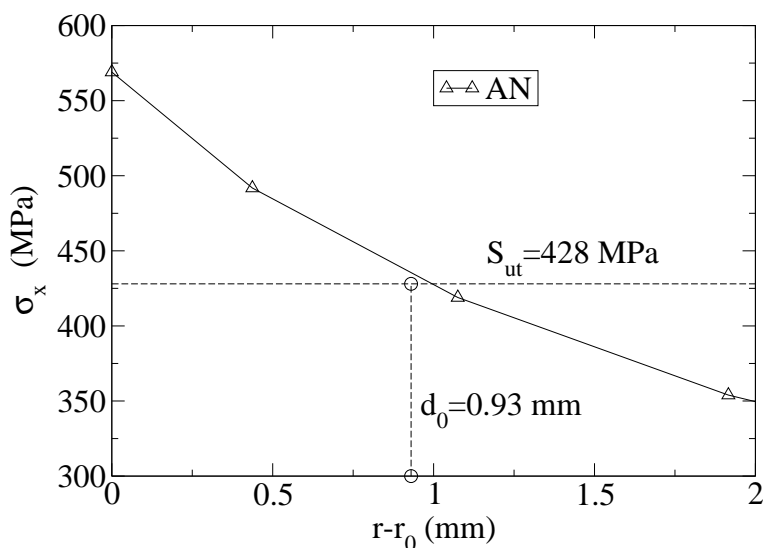


Figura 6.5: Aplicación del método *Point Stress* a la probeta tipo AN

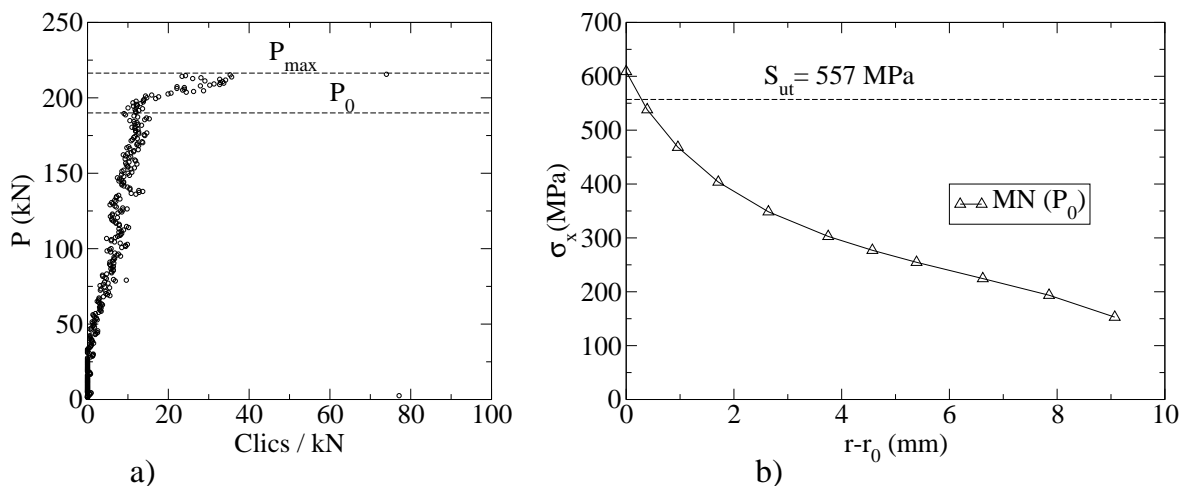


Figura 6.6: Inicio del fallo (probetas MN)

es de 196 kN (un 87% de la carga media de rotura). El esfuerzo de pico obtenido es de 609 MPa, es decir, un 9.3% superior al esfuerzo de rotura del laminado.

En el caso de las probetas AN los resultados obtenidos son muy similares, ya que la carga P_0 media obtenida es de 168 kN, es decir, un 85% de la carga media de rotura, que aplicada al modelo de elementos finitos, da un valor máximo de esfuerzo de 489 MPa, un 13% superior a la resistencia a tracción del laminado (figura 6.7).

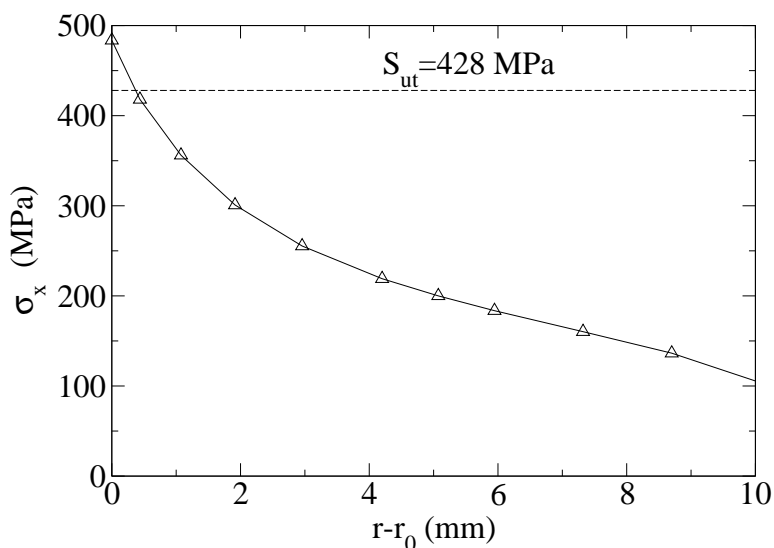


Figura 6.7: Inicio del fallo (probetas AN)

6.2.2 Compresión local

En el caso de compresión local, se dispone de dos probetas realizadas en el material tipo M: las probetas tipo B y MB. Las probetas tipo B están formadas por un laminado de unos 9 mm de espesor, 100 mm de anchura y 350 mm de largo, al que se han realizado dos agujeros de 25 mm de diámetro a una distancia de 75 mm de ambos extremos, y la carga se introduce mediante un cilindro de acero insertado en los agujeros. La geometría de las probetas tipo B, al igual que la de las probetas tipo N, correspondería a una junta a solape doble en la que no existiese ningún apriete lateral. Las probetas tipo MB, están formadas por dos uniones tipo T-bolt colocadas en los extremos de un laminado de unos 37 mm de espesor por 75 mm de anchura y 300 mm de longitud; el agujero del bulón es de 30 mm y el del vástago de 21 mm.

Las resistencias medias (S_b) obtenidas para cada uno de estos tipos de probeta se pueden ver en la tabla 6.2.

	B	MB
P_{max} (kN)	101	280
S_b (MPa)	444	365

Tabla 6.2: Valores de medios de resistencia en compresión local

Al contrario de lo que sucedía en el caso de tensión neta, los esfuerzos medios en compresión local presentan una importante diferencia del 22%, con el agravante de que esta diferencia no cae del lado de la seguridad. Se podría sugerir que, en realidad, el área resistente en compresión local en las juntas T-bolt, en vez de corresponder al área A_b definida en el capítulo 5 (figura 6.8) vendría definida por el área A'_b (también representada en la figura 6.8) y que viene definida por la expresión:

$$A'_b = (t - d)D \tag{6.1}$$

Ahora bien, si recalculamos el valor de S_b a partir del área resistente A'_b obtenemos 583MPa, que

comparado con el valor obtenido por la probeta tip B, presenta un error del 24%, es decir del mismo orden que el anterior, aunque con la ventaja de caer esta vez del lado de la seguridad.

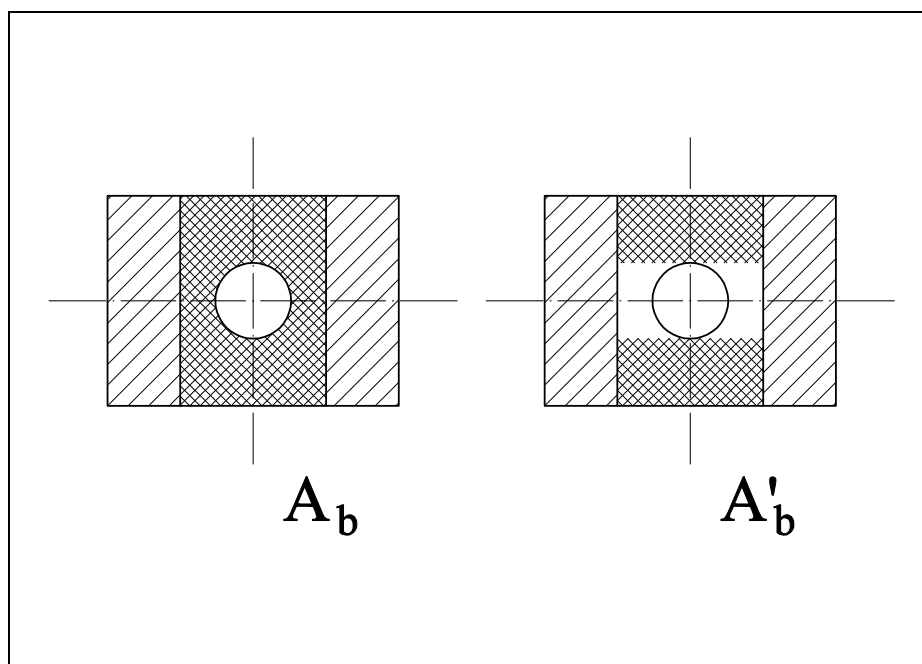
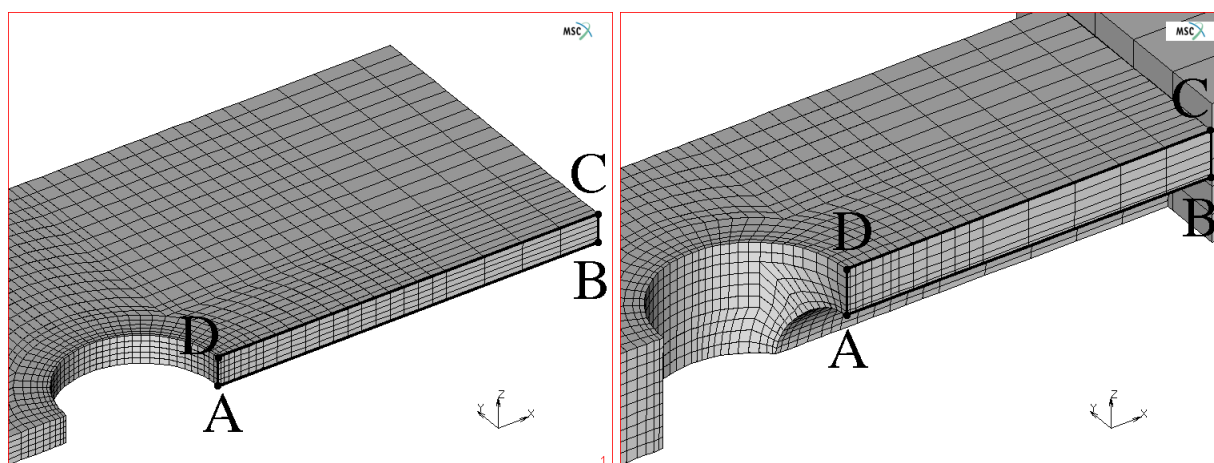


Figura 6.8: Distintas áreas resistentes

Al igual que en el caso de tensión neta, el siguiente paso ha consistido en analizar las distribuciones de esfuerzos en la zona del fallo en compresión local. Para ello se han realizado dos modelos de elementos finitos del tipo descrito en el capítulo 4, representando los tipos B y MB de probetas. En la figura 6.9 se muestran detalles de los dos modelos en los que se indica la zona sobre la que se han medido los esfuerzos en cada uno de ellos.



(a) Probeta tipo B

(b) Probeta tipo MB

Figura 6.9: Modelos de las probetas tipo B y MB

Como en el caso de tensión neta, para las dos geometrías se ha tomado el plano que, pasando por el eje del bulón, corta al punto de máximo esfuerzo $|\sigma_x|$ que, en este tipo de probetas, está situado en la zona más próxima al agujero del vástago.

Al igual que en el caso de tensión neta, únicamente se han tomado en cuenta los valores de la componente σ_x , aunque en el caso de compresión local otras componentes, como σ_y , no son despreciables, puesto que, como en el caso de tensión neta, observando la fractura vemos que esta componente es la principal responsable del fallo. Esto se hace para simplificar el análisis, teniendo en cuenta además que, como se puede observar en las figuras 4.26 a 4.30 del capítulo 4, en las que se comparan los esfuerzos en juntas a solape con los de la T-bolt, los valores relativos de los distintos tipos de esfuerzo son muy similares en los dos tipos junta, por lo que se puede asumir que es posible tomar una de las componentes como representante del estado de tensiones de un punto dado.

En la figura 6.10 se observan los resultados obtenidos para las probetas B y MB. Como se puede ver, en este caso se ha decidido representar los valores de los esfuerzos en toda la superficie A-B-C-D, ya que las variaciones a lo largo del espesor son mucho más elevadas que en la zona de tensión neta. Para interpretar correctamente esta gráfica es necesario tener en cuenta los siguientes puntos:

- La anchura t del área A-B-C-D ha sido normalizada entre 0 y 1 para permitir la comparación directa entre ambas distribuciones de esfuerzos.
- Dado que los esfuerzos más importantes son negativos, se ha invertido el eje vertical (con los esfuerzos negativos hacia arriba) para permitir una visualización más clara de la gráfica.
- La superficie coloreada corresponde a los esfuerzos en el modelo tipo MB, y la superficie mostrada como una malla de alambre corresponde a la probeta tipo B.

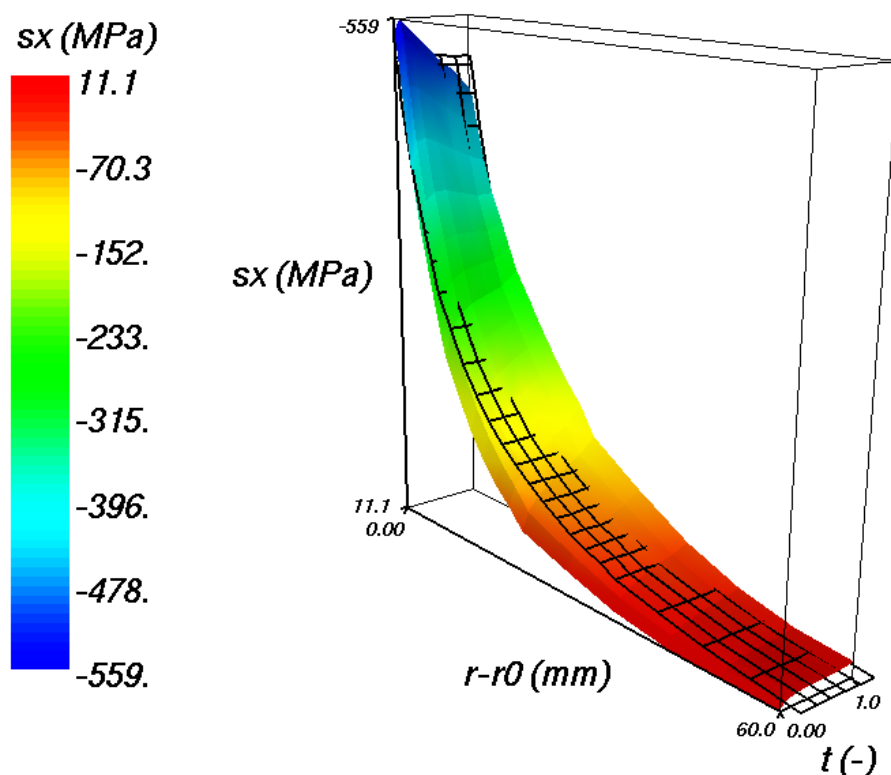


Figura 6.10: Compresión local, probetas tipo B y MB

En la figura 6.10 se observa que, al contrario de lo que sucedía con los valores medios de los esfuerzos, las distribuciones de los mismos en la zona representada muestran una correspondencia

excelente, con la única diferencia de que el modelo tipo MB presenta una variabilidad mucho mayor que el tipo B, en la dirección del espesor.

Concretamente, se observa en la gráfica 6.10 que los valores medios del modelo MB coinciden casi perfectamente con los del modelo B, por lo que, para obtener una representación gráfica más sencilla, en la figura 6.11 se muestra un corte de la figura anterior por el plano $t \approx 0.5$.

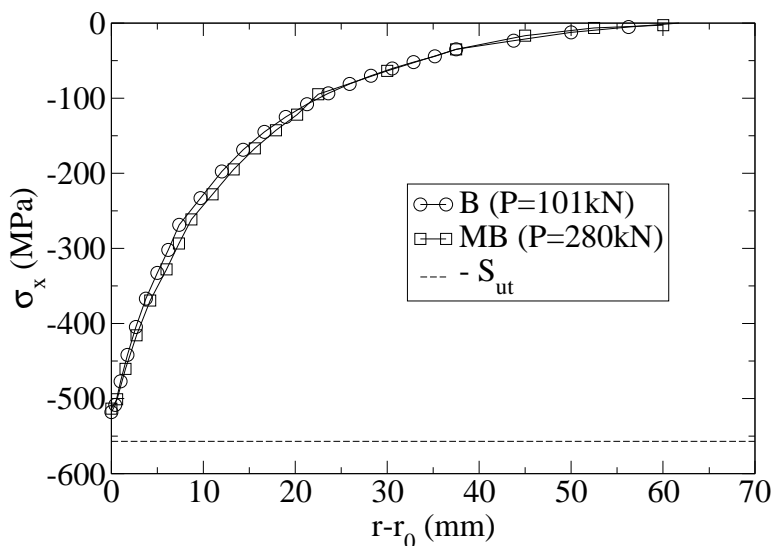


Figura 6.11: Compresión local, probetas tipo B y MB

La diferencia entre los valores de esfuerzo σ_x máximos es inferior al 1%. De todas formas, ya se ha comentado antes, que este valor extremo es muy sensible a variaciones en el mallado, por lo que este nivel de precisión probablemente sea difícilmente reproducible.

Otra posible crítica que podría hacerse a estos resultados es que la comparación se ha realizado tomando los valores más favorables, ya que en la gráfica de la figura 6.10 se observa que los esfuerzos presentan una gran variación a lo largo del espesor en el modelo MB. De todas formas, si en vez de tomar el valor medio, se tomase la estimación más conservadora posible, que consistiría en exigir que coincidiesen los máximos de las dos superficies representadas en la figura 6.10, se obtendría un error inferior al 8%, del lado de la seguridad, lo cual, teniendo en cuenta la complejidad de la fenomenología asociada a los fallos por compresión local supone una aproximación aceptable.

En cuanto a la aplicación de métodos tipo *Point Stress*, el primer obstáculo que nos encontramos es que la obtención de valores fiables de resistencia a la compresión del laminado es mucho más complicada que en el caso de la tensión neta. De todas formas, la experiencia demuestra que la resistencia a compresión en laminados casi-isótropos, como los utilizados en los ensayos, es muy similar a la resistencia a tracción, pero en caso de considerar $S_{uc} = S_{ut}$ vemos que es imposible aplicar el método del *Point Stress*, ya que, como puede verse en la figura 6.11 los esfuerzos en la zona considerada no alcanzan nunca el valor de la resistencia a tracción. Por otra parte, en la mayoría de trabajos relacionados con este método, se muestra que la eficacia del mismo para la predicción del fallo en compresión local es bastante reducida, en comparación con la que presenta en la zona de tensión neta.

Estos problemas relacionados con el método de Whitney Nuismer hacen que sea muy difícil la extrapolación de los resultados obtenidos para un material a otros laminados, aunque estos tengan

características similares. De todas formas, como la distribución de esfuerzos es similar, siempre que trabajemos con laminados casi-isótropos, en principio, debería cumplirse que la curva de esfuerzos normalizados con el valor de la resistencia a compresión del laminado presentara valores muy similares para distintos materiales.

A modo de prueba, se ha realizado un modelo de las probetas tipo AB y, a falta de resultados fiables de la resistencia a compresión del laminado, se han escalado los resultados obtenidos dividiendolos por su resistencia a tracción. En las figuras 6.12 y 6.13 se muestran los resultados obtenidos comparados con los obtenidos para la probeta tipo B: en la figura 6.12 se muestran los resultados sin escalar en la misma zona que se utilizaba para las probetas MB, y en la figura 6.13 se muestra un corte por el plano $t = 0.5$. En esta última gráfica, los resultados se han escalado dividiendo los valores de cada curva por la resistencia a tracción de los respectivos laminados

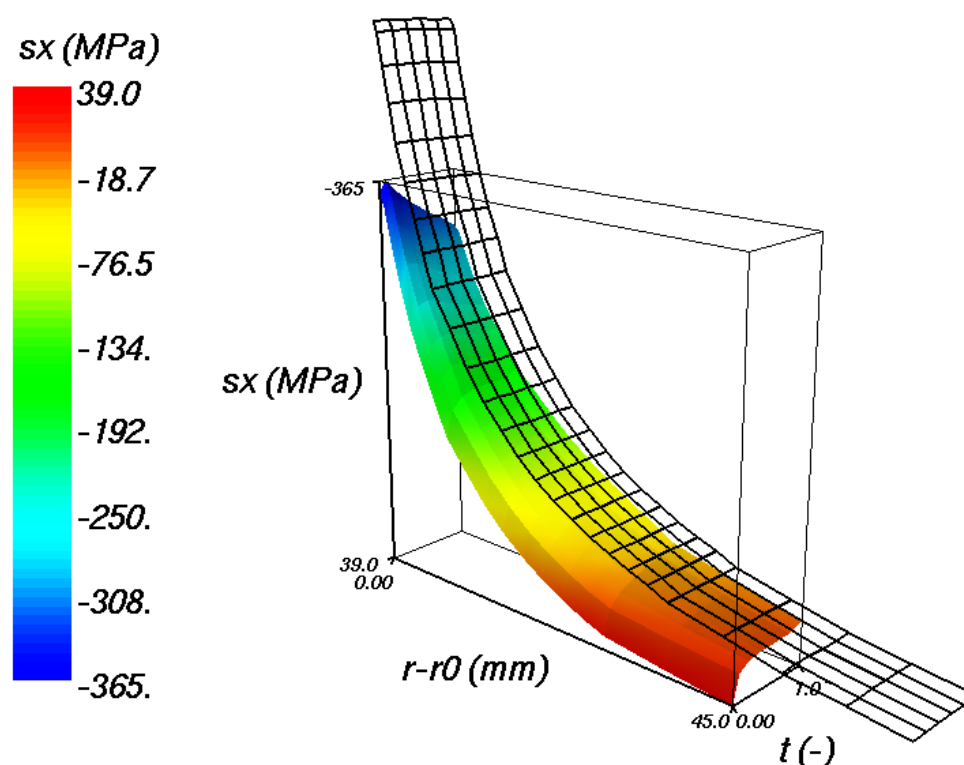


Figura 6.12: Compresión local, probetas tipo B y AB

Los resultados obtenidos no son muy satisfactorios, ya que el error, si comparamos los picos de las gráficas de la figura 6.13, es de aproximadamente un 22% (con el agravante de que la estimación se produciría por exceso). De todas formas, estas diferencias no son de extrañar si tenemos en cuenta que algunas de las características que pueden influir de forma importante en la resistencia a la compresión, como el diámetro de fibra o el espesor de capa, son totalmente distintas en los dos laminados considerados, lo que puede provocar que la relación de resistencias a la tracción entre ambos sea bastante distinta a la relación de resistencias a compresión. Por otra parte, en este caso, si en vez de tomar el valor medio, tomamos la opción más conservadora, el error se reduce a menos del 9%.

Como conclusión, podemos decir que, en el caso de compresión local, se puede predecir la resistencia a compresión local de la T-bolt de forma bastante ajustada, siempre que se cuente con ensayos realizados con probetas tipo B fabricadas con el mismo material con el que se va a fabricar la T-bolt.

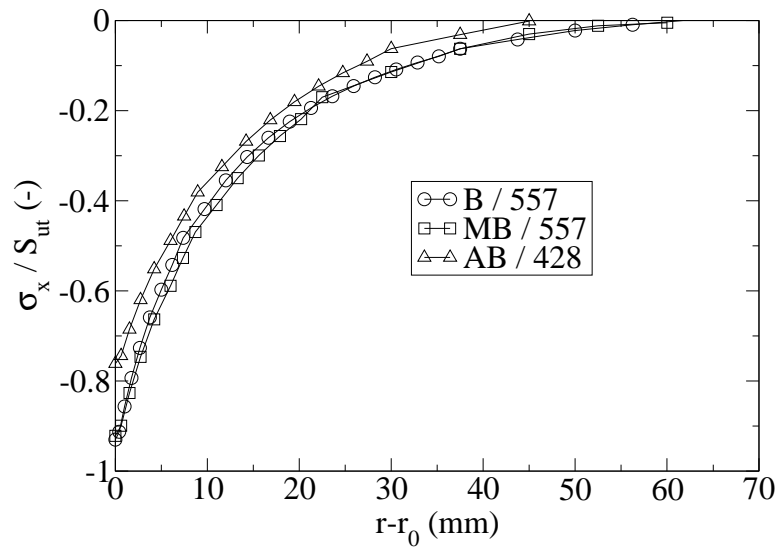


Figura 6.13: Compresión local, esfuerzo normalizado, probetas tipo B, MB y AB

En cambio, no es posible, en principio, extrapolar estos resultados a juntas fabricadas a partir de laminados distintos utilizando como base para la comparación las resistencias a tracción de los distintos laminados. Existe la posibilidad, que debería investigarse, de que a partir de medidas fiables de la resistencia a compresión de los dos laminados pudieran realizarse predicciones para laminados similares, si bien esta posibilidad tampoco presenta grandes ventajas, ya que obligaría a realizar ensayos de resistencia a compresión que no son en principio mucho más sencillos que el ensayo de las probetas tipo B.