6. CONCLUSIONES

6.1. INTRODUCCIÓN

El objetivo de este proyecto consiste en estudiar la evaluación de la resistencia a cizalladura intralaminar que presentan los materiales compuestos de grafito con una matriz epoxi, mediante el ensayo de tracción Off-Axis. Este ensayo destaca por reducir el grado de complejidad con respecto a otras propuestas que se emplean para este fin, tanto en la geometría de la probeta como en la ejecución del ensayo.

Para ello, se ha realizado un estudio previo sobre unos laminados existentes, cuyas propiedades eran conocidas, para establecer si probetas rectangulares con tacones rectos, con ratios comprendidos entre 5 y 8 para fibra orientada 10^{o} respecto de la dirección de carga, y ratio 3 para laminados con fibra orientada a 30^{o}, constituyen configuraciones viables para la determinación de la resistencia a cizalladura intralaminar S.

Los resultados obtenidos de los estudios previos indicaban que las configuraciones utilizadas resultaban inadecuadas, por lo que se procedió, tanto a aumentar el ratio de las probetas hasta un valor de 10, como a reorientar las fibras del laminado a 15^{o}. A su vez, se procedió a estudiar la influencia de los tacones sobre el estado tensional, y para ello se plantearon dos configuraciones de probetas, unas con tacones rectos y otras con tacones oblicuos.

Tras analizar los resultados experimentales, se realizó un estudio numérico mediante un modelo de elementos finitos de los ensayos realizados, obteniendo así los campos de tensiones de cada configuración. Aplicando criterios de fallo, se puede obtener de manera indirecta un valor de la resistencia a cizalladura S en base a los estados tensionales evaluados.

A continuación, se procede a enumerar las conclusiones obtenidas en este proyecto.

6.2. CONCLUSIONES

En primera instancia, a diferencia del caso de la evaluación del módulo de cizalladura G_{12}, donde con especímenes inferiores a ratio 10 se podían alcanzar buenos resultados, para la evaluación de la resistencia S necesitamos recurrir a ratios mayores o iguales a 10.

Esto se debe a que es necesario especímenes con longitudes libres mayores que el espacio mínimo que requiere la fibra para atravesar el ancho de la probeta sin que ninguno de los extremos de la fibra se encuentre cerca o dentro de los tacones, y a que para ratios inferiores a 10, con orientaciones de 10^{o}, se producen estados tensionales fuertemente no uniformes.

Por ello, se deben emplear para ensayos, especímenes con ratio 10 como mínimo para la evaluación de la resistencia a cizalladura S.

Otro de los puntos tratados durante este proyecto ha sido la orientación del laminado. Se han empleado tres orientaciones distintas, 10^o, 15^o y 30^o. En la evaluación del módulo a cizalladura se necesitaban orientaciones en torno a los 10^o, ya que se alcanzaba el máximo de la relación deformación tangencial frente a deformación longitudinal, consiguiendo el mínimo error en desviaciones de laminados de $\pm 1^o$, mientras que si se aumentaba la orientación de las fibras, se reducía este valor máximo, y se incurría en posibles errores con la desviación de las fibras.

Como se obtuvo de los estudios preliminares, la orientación de 30^o no resulta adecuada para la evaluación de la resistencia a cizalladura S, puesto que da lugar a un fallo dominado por la componente normal en dirección perpendicular a las fibras σ_2. Por otra parte, la orientación de 10^o, bajo una configuración ideal, produciría un estado tensional en el que domina la tensión tangencial σ_{12}; sin embargo, en la práctica y bajo las configuraciones reales del ensayo se generan concentradores de tensiones en los extremos que afectan al estado tensional en la probeta conduciendo a estados no uniformes.

Debido a ello se decide elegir como alternativa una orientación de 15^o, en la que resulta ligeramente menos dominante la σ_{12}, pero produce un estado con mayor uniformidad.

Como conclusión de este punto, se extrae que, pese a que la orientación óptima de acuerdo a los criterios de fallo son laminados de 10^o, con laminados de 15^o se consigue mejores resultados.

Para analizar la influencia de la geometría de los tacones se realiza en el proyecto una comparativa entre dos sistemas de cogida distintos, rectos y oblicuos. Los tacones rectos son los estándares usados en todos los ensayos de tracción de laminados. Los tacones oblicuos pretenden reducir el impedimento de deformación de la probeta, consiguiendo que la deformada resultante se asemeje al problema ideal.

Otro objetivo de los tacones oblicuos es reducir el concentrador de tensiones que se produce en la esquina del espécimen de tacones rectos debido al empotramiento en el extremo, de modo que, si se reduce este valor, se puede conseguir un campo más uniforme de tensiones en toda la probeta o al menos en la zona central.

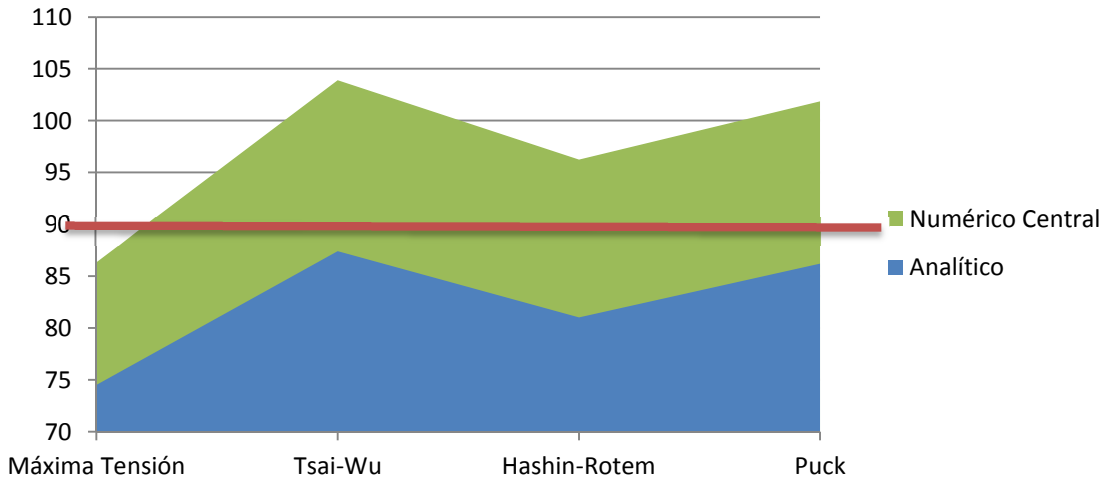
Para poder analizar el campo de tensiones, se recurre al estudio de elementos finitos de los campos resultantes para cada una de las tensiones que intervienen: longitudinal, transversal y tangencial. Si se realiza una comparativa entre cada uno de estos mapas tensionales, se llega a la conclusión que los especímenes de tacones rectos presentan un campo mucho más irregular, con variaciones a lo largo de toda la probeta, sin embargo, con tacones oblicuos se consigue un campo uniforme en el centro del espécimen, presentando menores variaciones a lo largo de toda la línea central de posible rotura.

Gracias a estos resultados se puede garantizar que un laminado con unos tacones oblicuos consigue un campo tensional uniforme en la línea central del fallo, por lo que la probabilidad de que el fallo ocurra en esta zona aumenta. Los resultados experimentales corroboran este hecho. Analizando los resultados experimentales se observa que la mitad de las probetas ensayadas con esta configuración presentan una fractura central, y el resto

cercanas a éstas. Por su lado, los tacones rectos presentan fallos más cercanos al borde del tacón, lo que acarrea una variación respecto del valor real de resistencia debida a factores externos.

El último punto que queda por comentar es el referente a los valores que se alcanzan para la resistencia a cizalladura intralaminar según sea el tacón recto u oblicuo y la zona donde se haya producido el fallo.

De este modo, si se comparan primero los resultados en tacones rectos, se observa que las roturas generadas presentan gran desviación de zonas de fallo, comprendidas entre la zona central de la probeta y la zona cercana al borde del tacón, por lo que solamente se estudia los datos en la zona central por ser la que menos influencia sufre del concentrador de tensiones. Así mismo, como se puede observar en la tabla 5.7, existe una variación entre cada criterio comprendido entre el máximo de 100.62 de Tsai-Wu y el mínimo de 84.01 de Máxima Tensión. Esta variación es aceptable ya que nos movemos en torno a un valor de 90 MPa.



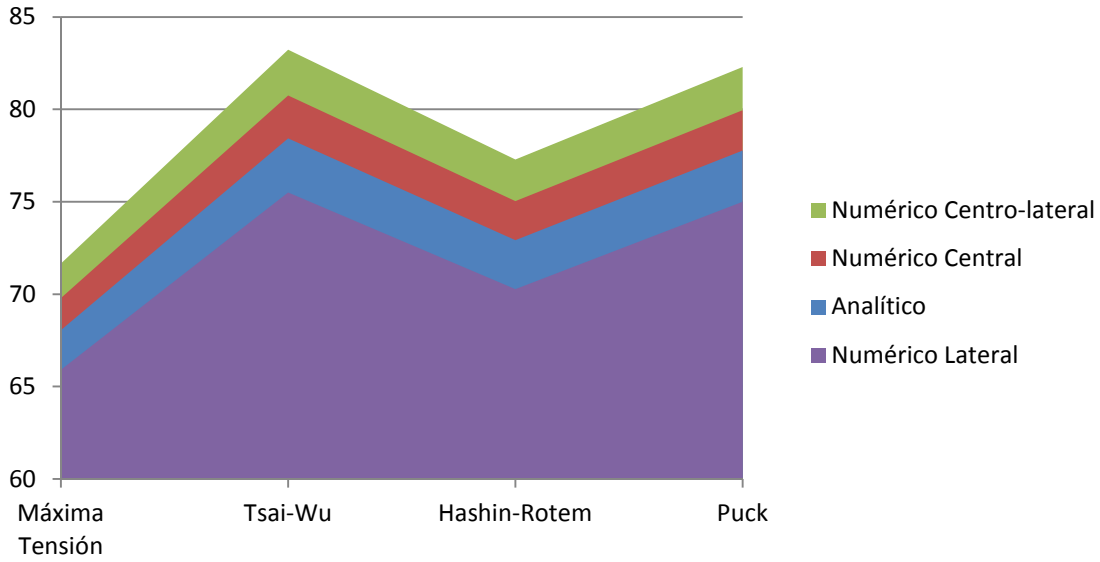
Gráfica 6. 1: Valores de la resistencia S de los resultados analíticos y el estudio numérico central para cada uno de los criterios empleados, comparados con un valor medio de 90 MPa.

Si se analiza ahora los resultados de tacones oblicuos, lo primero que se destaca es que todas las roturas se producen en la zona central, por lo que todos los ensayos serían válidos para el estudio. Analizando los datos, se observa que para cada criterio, ambos puntos de corte estudiados presentan valores similares de tensión y por lo tanto el valor de la resistencia S será consecuentemente similar. El rango varía entre 68.96 de Máxima Tensión y 79.64 de Tsai-Wu en el caso de la rotura central y entre 68.14 (MT) y 78.53 (TW) para el caso más desfavorable de rotura lateral.

Cabe destacar tanto para tacones rectos como para oblicuos, que el valor máximo de la resistencia a cizalladura es alcanzado por Tsai-Wu seguido de Puck, y el mínimo el de Máxima Tensión. Hashin-Rotem presenta valores intermedios a los anteriores.

Se puede observar en el siguiente gráfico cómo es la diferencia entre cada uno de los sistemas estudiados, ya sea el caso experimental o cualquiera de los analíticos central, centro-lateral o lateral comparados por criterios empleados. Todos los valores están por debajo de la

línea media de 90 MPa como se obtuvo en el caso de tacones rectos, sin embargo, todos los valores obtenidos de la resistencia S están muy próximos entre sí tanto comparando por criterios como por modo de fallo.



Gráfica 6. 2: Valores de la resistencia S de los resultados analíticos y el estudio numérico central, centro-lateral y lateral para cada uno de los criterios empleados.

6.3. DESARROLLOS FUTUROS

Una vez definidas todas las conclusiones obtenidas de este proyecto, falta dar algunas directrices sobre posibles acciones futuras que pueden mejorar el estudio de la evaluación de la resistencia a cizalladura intralaminar S.

La primera vía de desarrollo es comprobar el campo de tensiones. Para estudiar los estados tensionales de las distintas configuraciones, se han realizado estudios numéricos basados en programas de elementos finitos, obteniendo unos resultados considerados aceptables. Sin embargo, sería preciso verificar de forma experimental que efectivamente la naturaleza de los estados tensionales obtenidos coincide con los ensayos. Una posible herramienta para llevar a cabo este estudio es la interferometría de Moiré, encargado de medir, mediante un haz de luz incidente en la probeta, el campo de deformaciones resultante.

Otro campo de desarrollo es analizar el sistema con un comportamiento lo más real posible. Como se vio en el capítulo cuarto, el valor de la pendiente del módulo de elasticidad del material no presenta un comportamiento lineal, sino que el módulo va descendiendo conforme llega al estado último de carga. En este proyecto, se ha empleado un sistema aproximado al lineal que consiste en es utilizar el módulo secante, sin embargo, empleando la evolución no lineal de éste parámetro, se conseguiría un estudio mucho más preciso. Se debería emplear un programa de elementos finitos que acepte variables no lineales.