

8. Conclusiones y desarrollos futuros

Todo el desarrollo realizado en el proyecto sirve como un análisis preliminar para el proceso de desarrollo de un criterio de fallo específico para el diseño de rigidizadores con perfil en T frente al fallo por Unfolding, de forma que permita mejorar en precisión los actuales métodos usados en la industria aeronáutica, los cuales no resultan del todo eficaces.

En dicho análisis se pueden destacar dos tareas principales: una revisión de los ensayos llevados a cabo por *TEAMS S.L.* y un estudio analítico del estado tensional en la probeta del ensayo ILTS.

Respecto a la revisión de ensayos experimentales, se han encontrado un total de 142 ensayos ILTS con el uso de tres distintos materiales en tres acondicionamientos distintos, combinando estos en ensayos en series de seis o siete probetas de geometría similar, así como un total de 136 ensayos para perfiles en T con el uso de dos materiales aunque todo en acondicionamiento AR/RT, pero que a su vez se ha distinguido distintas tipologías de ensayo y aplicación de la carga.

Estos resultados, por un lado, servirán como base para contrastar futuros desarrollos y, por otro, nos han servido para seleccionar el material IMA/M21E (194 g/m²) como objeto del estudio analítico, dado que es el único material en común entre los ensayos ILTS y de los perfiles en T encontrado en la revisión de ensayos experimentales.

Respecto al estudio del estado tensional en la probeta del ensayo ILTS, se pueden destacar, a su vez, otras dos tareas: en primer lugar, el desarrollo de una relación analítica entre la carga aplicada por las mordazas P y el desplazamiento de éstas δ , lo que nos permite determinar los esfuerzos a los que está sometida la probeta durante el ensayo, y, en segundo lugar, la obtención de una solución analítica para las tensiones σ_{33} en función de los citados esfuerzos.

Los resultados de este análisis, aunque están referidos a probetas en L, son de especial interés en el proceso de desarrollo de un criterio de fallo por unfolding de uniones en T.

En primer lugar, permiten determinar el nivel de incertidumbre existente en el cálculo de los admisibles S_{33} , necesarios en el posterior desarrollo de dicho criterio de fallo. Por otro, sirven como base para el desarrollo de relaciones analíticas similares para el caso, más complejo, de las uniones en T.

En el desarrollo de las expresiones analíticas se han empleado distintas hipótesis de partida que han dado lugar a distintos modelos cada vez más complejos. Para el caso de las relaciones $P - \delta$ se había aproximado en primer lugar que todo el brazo de la probeta contenido entre los rodillos giraba un ángulo φ que no dependía de la posición en dicho brazo, tal y como proponía la normativa ASTM, pero se comprobó que esta aproximación producía grandes errores en la relación $P - \delta$ con respecto a la experimental. De esta forma se pasó a un nuevo cálculo considerando una variación del ángulo ϕ , lo que nos introdujo que las cargas aplicadas por ambos rodillos no son paralelas, de forma que aparecía un esfuerzo axil en toda la probeta así como un cortante también en la zona curva. Sin embargo se comprobó que incluso despreciando el axil y el cortante en la zona curva de la probeta se obtenía una relación $P - \delta$ bastante más aproximada que en el modelo más fidedigno a la normativa ASTM. Por último se comprobó que considerando las propiedades distintas de las zonas sometidas a compresión se conseguía obtener unos resultados mucho más similares a lo obtenido experimentalmente.

Con respecto al caso del cálculo de las tensiones σ_{33} se comprobó en primer lugar que la hipótesis de lámina rebajada producía por el método desarrollado una peor aproximación a la distribución que se obtenía por Lekhnitskii, y que al eliminar dicha hipótesis para materiales homogéneos anisótropos se obtenía casi la misma distribución que Lekhnitskii con errores muy pequeños, aunque el máximo en todo caso dependía muy similar. Aplicando estos mismos desarrollos a los materiales compuestos se observaba que tanto al eliminar la hipótesis de lámina rebajada así como al aplicar las propiedades distintas en las zonas sometidas a compresión se obtenía una mejor aproximación del punto de rotura, y

además se observaba que el máximo obtenido era en algunos casos distinto al obtenido por Lekhnitskii.

Las distintas relaciones para la relación entre la carga aplicada por las mordazas y el desplazamiento de las mismas se ha comparado con los resultados experimentales realizados por *TEAMS S.L.* obteniéndose un ajuste muy satisfactorio, en particular, cuando se ha considerado la variación del giro de la sección a lo largo del tramo entre rodillos.

Por tanto, el desarrollo llevado a cabo proporciona una herramienta de especial utilidad a la hora de monitorizar los ensayos ILTS dado que permite conocer a priori el comportamiento esperado de la probeta y, en el caso en que se aprecien desviaciones significativas, detectar posibles errores en el montaje del ensayo o poner sobre aviso al técnico para prestar especial atención a la rotura de la probeta.

Las soluciones analíticas del estado tensional de las probetas, en el instante del fallo, han sido comparadas con las fotografías que muestran las probetas tras los ensayos, existiendo una correlación aceptable entre la posición en que se ha producido el fallo y la posición en que se obtienen las tensiones máximas.

Más aún, los valores de los valores máximos de las tensiones en el instante del fallo se ajustan de forma razonable, dentro de la dispersión propia del ensayo, a un admisible S_{33} del orden del admisible S_{22} del material.

No obstante, para validar la solución analítica obtenida para el estado tensional es preciso llevar a cabo algunos análisis adicionales dado que la única comprobación efectuada, aparte de la comparación cualitativa con los ensayos experimentales descrita anteriormente, es una comparación con la solución analítica para un material anisótropo homogéneo. Dicha validación se podría llevar a cabo mediante un análisis de elementos finitos.

Dentro de los posibles desarrollos futuros, destacar, en primer lugar el incluir las tensiones σ_{13} en el análisis, dado que (fuera del plano de simetría de la probeta) pueden existir zonas donde la acción conjunta de σ_{33} y σ_{13} sean más desfavorables que las tensiones σ_{33} en el plano de simetría.

Por último, antes de pasar al estudio de los perfiles en T, sería conveniente realizar ensayos sobre perfiles en L sometidos a estados de carga más complejos, para ver si el estudio analítico de dichos perfiles ofrece unos admisibles que concuerdan con los del ensayo ILTS.