

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN

1.1.- Antecedentes:

El presente Proyecto se enmarca bajo la normativa de Proyecto Fin de Carrera de la Escuela Superior de Ingenieros de Sevilla para la obtención de los créditos de la asignatura “Proyecto Fin de Carrera” y así obtener el título de Ingeniero Aeronáutico (plan 2002).

El departamento adjudicador del Proyecto ha sido el Departamento de Mecánica de los Medios Continuos, Teoría de Estructuras e Ingeniería del Terreno siendo los tutores D. Jesús Justo Estebaranz y D. José Antonio Reinoso Cuevas que pertenece en la actualidad a la Universidad de Hannover.

1.2.- Motivación:

En los últimos años se ha incrementado el uso de materiales compuestos en la industria aeroespacial. Tras la aparición de los modelos A350WXB de Airbus y 787 de Boeing, con un 53 y 50 % respectivamente de peso en material compuesto, se ha constatado la tendencia de las dos mayores empresas del sector a incluir cada vez más piezas fabricadas con estos materiales en lugar de seguir utilizando las aleaciones tradicionales. Esto es así ya que estos materiales presentan ventajas, como la disminución de peso y el aumento de las propiedades específicas del material, frente a las aleaciones tradicionales

Siguiendo esta tendencia, se ha observado también un incremento en el uso de paneles rigidizados fabricados de material compuesto. Estos paneles están formados por una piel (*skin*) delgada con perfiles integrados en una o dos direcciones (*stringers*, *frames*) como se muestra en la figura 1.1 y se utilizan principalmente en el recubrimiento de alas y fuselajes.

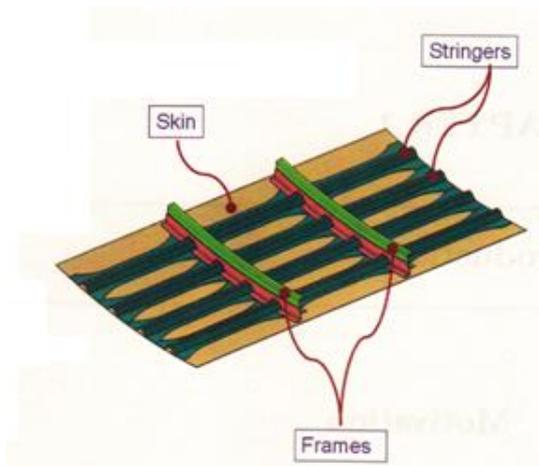


Fig.1.1. Componentes de los paneles rigidizados (tomado de [8]).

Desde el punto de vista estructural, estos paneles tienen tendencia a presentar inestabilidades estructurales locales bajo determinadas condiciones de carga en compresión. Concretamente, al estudiar la forma de la estructura deformada tras la primera carga de pandeo se puede observar que ésta presenta ondas que siguen un patrón formado por líneas nodales y anti-nodales a lo largo de toda la estructura como se puede ver en la figura 1.2.



Fig.1.2. Deformada del panel tras la 1ª carga de pandeo (tomado de [8]).

Sin embargo, se ha observado ([2]) que una vez alcanzada la carga de pandeo, el panel es capaz de seguir cumpliendo su capacidad portante hasta alcanzar una carga de hasta 3 veces la carga de pandeo.

Por ello, con el objetivo de aprovechar al máximo la capacidad portante de estos paneles, han surgido en los últimos años diversos trabajos de investigación que tratan de estudiar el comportamiento en régimen de post-pandeo de estos paneles.

Estos trabajos están englobados dentro del marco de los proyectos europeos POSICOSS, que trata de desarrollar herramientas para el diseño de estructuras de fuselaje, COCOMAT, que trata de incorporar la degradación de los materiales compuestos a los modelos numéricos del comportamiento de los paneles y ALCAS que trata de implementar todos los resultados conseguidos en los anteriores proyectos al diseño de un avión tipo *jet* fabricado únicamente de material compuesto.

En el marco de estos proyectos surge la tesis de D. José Antonio Reinoso Cuevas titulada “*Study of Composite Stiffened Panels in Postbuckling Regime*” [8] realizada en Febrero de 2012 y de la que nace este proyecto.

En ella se estudia el comportamiento de los paneles rigidizados de material compuesto desde el inicio del régimen de postpandeo hasta el colapso de forma numérica y experimental.

Respecto al estudio numérico, en el trabajo realizado por D. J. Antonio Reinoso se desarrollan distintos modelos usando el método de los elementos finitos con elementos tipo *Shell* con los que se consiguen estimaciones bastante precisas de los campos de tensiones en las uniones piel-rigidizador. Además, se implementa un método de análisis computacional en el programa ABAQUS que permite modelar el proceso de daño en este tipo de paneles durante el post-pandeo.

Respecto al trabajo experimental, se ensayan 4 paneles en distintas condiciones de carga hasta el colapso. En ellos se confirma la elevada dependencia de la deformada de los paneles en régimen de post-pandeo con respecto a los defectos iniciales de fabricación y se caracterizan mediante ultrasonidos los procesos de despegue de las uniones piel-rigidizador que conducen al fallo global del panel.

Entre los posibles campos de investigaciones futuras sugeridas en el trabajo de J. Antonio Reinoso se identifica la necesidad de estudio de las uniones piel-rigidizador de forma local. En concreto, el autor propone varios ensayos a escala local, entre los que se incluye el ensayo de arrancamiento, con el objetivo de intentar reproducir el comportamiento en post-pandeo de las áreas más críticas de los paneles rigidizados y conseguir desarrollar a escala local un método para analizar el proceso de daño de las uniones piel-rigidizador.

Este proyecto surge por tanto, como consecuencia del trabajo desarrollado por este autor y con él se pretende realizar un estudio local del comportamiento de las uniones piel-rigidizador durante el ensayo de arrancamiento. Para ello, se han fabricado probetas que reproducen la geometría local de las uniones piel-rigidizador y se han realizado ensayos de arrancamiento.

1.3.- Objetivos del Proyecto:

El primer objetivo de este proyecto es el desarrollo y optimización del proceso de fabricación de las probetas que reproduzcan la geometría local de las uniones piel-rigidizador.

Este objetivo se ha marcado ya que no se han fabricado con anterioridad probetas de este tipo en el Laboratorio del Grupo de Elasticidad y Resistencia de Materiales y por tanto, es necesario definir un procedimiento que pueda ser empleado en este caso y en sucesivos ensayos.

El otro objetivo de este proyecto es el estudio local de uno los mecanismos de fallo en las uniones piel-rigidizador que llevan al colapso global del panel rigidizado. Este mecanismo de fallo se intentará reproducir mediante el ensayo de arrancamiento.

1.4.- Publicaciones estudiadas:

Además de la anteriormente mencionada Tesis de D. José Antonio Reinoso Cuevas, en la que se basa este proyecto, se han estudiado otros artículos publicados en diferentes revistas especializadas. En todos ellos se estudia el comportamiento de paneles de material compuesto con rigidizadores de forma teórica y/o experimental.

En cuanto a trabajos exclusivamente teóricos, se ha estudiado el contenido de [1] que presenta un estudio del comportamiento de paneles rigidizados sometidos a compresión y cizalladura. En este caso, se usa elasticidad lineal para el estudio del comportamiento del panel de material compuesto antes del pandeo y métodos no lineales durante el postpandeo para tratar de predecir el fallo de la estructura. En [3], se presentan estudios similares a los de [1] para el caso de paneles rectangulares con apoyo simple.

También es interesante el artículo [6], donde se recoge una revisión de gran parte de los estudios teóricos sobre uniones adhesivas de materiales compuestos publicados hasta la fecha, englobando tanto los métodos clásicos como el MEF. En este trabajo también se presentan algunos principios generales y reglas de diseño aplicables a la unión adhesiva de materiales compuestos.

En cuanto a trabajos experimentales se han analizado los resultados presentes en [2] donde se estudian paneles rigidizados cilíndricos sometidos a cargas de compresión y torsión. En este trabajo se observa que el panel es capaz de soportar hasta 3 veces la primera carga de pandeo y siempre se produce el fallo repentino y destructivo.

En [5] se presentan los resultados para el caso de paneles rigidizados con distintos tipos de rigidizadores, en T, I y omega, obteniéndose un mecanismo de fallo similar en todos los casos.

En [9] y [10] se presentan los resultados obtenidos para el caso de paneles con rigidizadores en I y en omega respectivamente. En ambos se corrobora la afirmación hecha en [2] sobre la carga máxima soportada por el panel.

En cuanto a trabajos que combinen desarrollos teóricos y experimentales se ha estudiado el artículo [11] donde se presentan los resultados obtenidos en el ensayo de paneles utilizando dos métodos de fabricación diferentes: el cocurado y el copegado, no obteniéndose diferencia en el comportamiento de los paneles según el método de

fabricación. Además se comparan los resultados obtenidos con los que se obtienen realizando un análisis teórico utilizando el Método de los Elementos Finitos (MEF).

En [4] y en [7] se presentan también trabajos que comparan resultados teóricos y experimentales. Concretamente, en [4] se ensayan paneles con rigidizadores en omega sometidos a cargas de compresión uniaxiales mientras que en [7] se realizan ensayos con paneles con rigidizadores en T sometidos a cargas simétricas y antisimétricas. Para realizar las correlaciones teóricas en ambos casos se usa el Método de los Elementos Finitos. En ambos casos se observa que el fallo de los paneles se da en la interfaz entre el rigidizador y el panel.

Por último, en [12] se relacionan los resultados de una serie de ensayos realizados a diferentes paneles con rigidizadores en T sometidos a carga de compresión con los resultados teóricos obtenidos en varios trabajos enmarcados dentro del proyecto POSICOSS.

1.5.- Plan de trabajo:

Con el objetivo de alcanzar los objetivos expuestos en el apartado 1.3 se han fabricado dos tipos de probetas, ALCAS y GERM, compuestas por un panel y un rigidizador en forma de T. Los dos tipos de probeta sólo que difieren entre sí en sus dimensiones, que se pueden ver en las figuras 1.3 y 1.4.

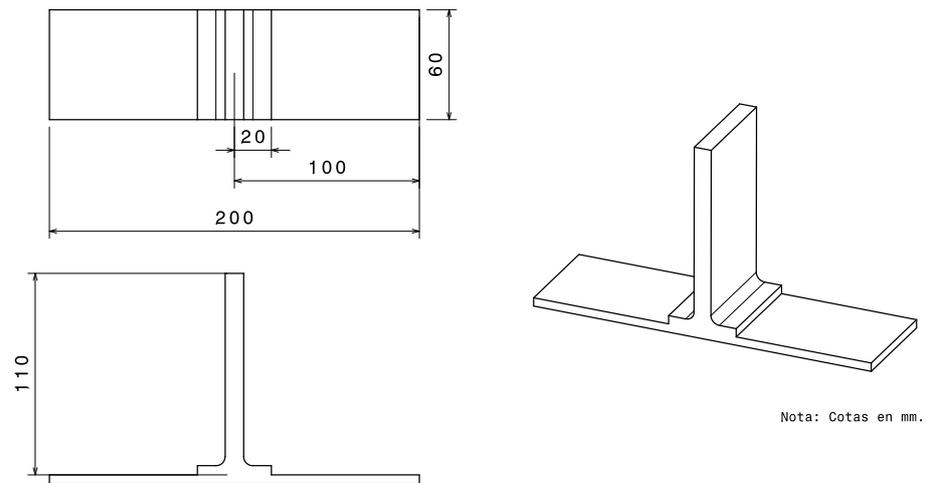


Fig. 1.3 .Dimensiones de las probetas tipo ALCAS.

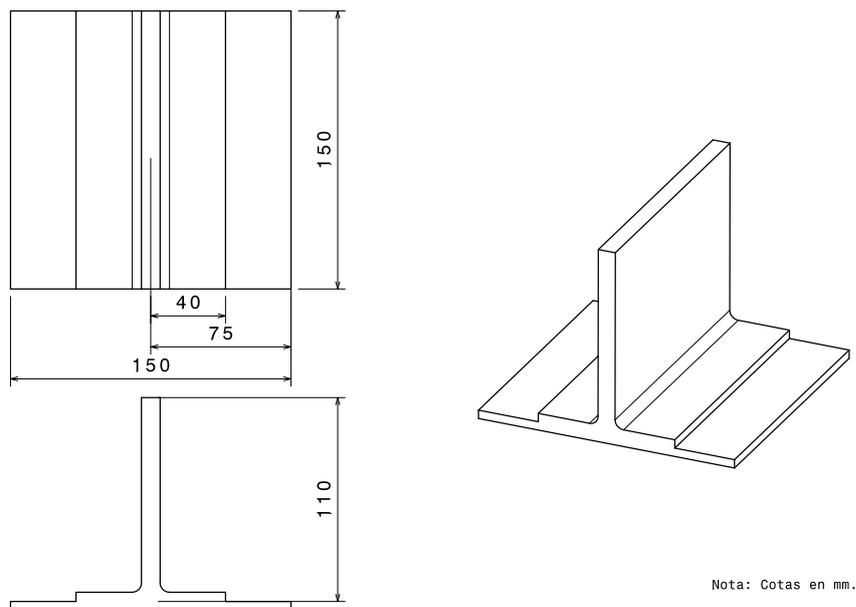


Fig. 1.4 .Dimensiones de las probetas tipo GERM.

Además, dentro de cada tipo de probetas se han utilizado dos secuencias de apilado distintas (ver Tabla 1.1). De esta forma se han obtenido 10 probetas de 4 tipos diferentes. En la Tabla 1.2 se recoge el número de probetas de cada tipo fabricadas.

	Tipo 1	Tipo 2
<i>Piel</i>	[45/-45/0/90/-45/45]s	[45/90/-45/90/0/-45/0]s
<i>Rigidizador</i>	[45/-45/0/-45/45]s	[45/0/-45/0/90]s

Tabla. 1.1. Configuraciones de los laminados [s=simétrico].

Tipo de probeta	Nº de probetas fabricadas
ALCAS Tipo 1	3
ALCAS Tipo 2	3
GERM Tipo 1	2
GERM Tipo 2	2

Tabla. 1.2. Resumen de probetas fabricadas.

Tras la fabricación de las probetas se diseñó un ensayo de arrancamiento o *pull-out* que permitiese reproducir las condiciones de contorno propuestas por D. José Antonio Reinoso Cuevas en su Tesis [8] (ver figura 1.5 y 1.6).

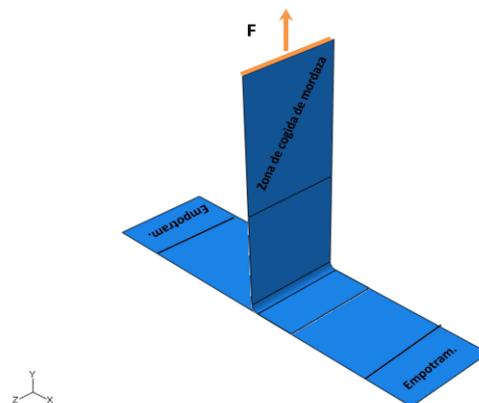


Fig. 1.5 .Condiciones de contorno de las probetas tipo ALCAS.

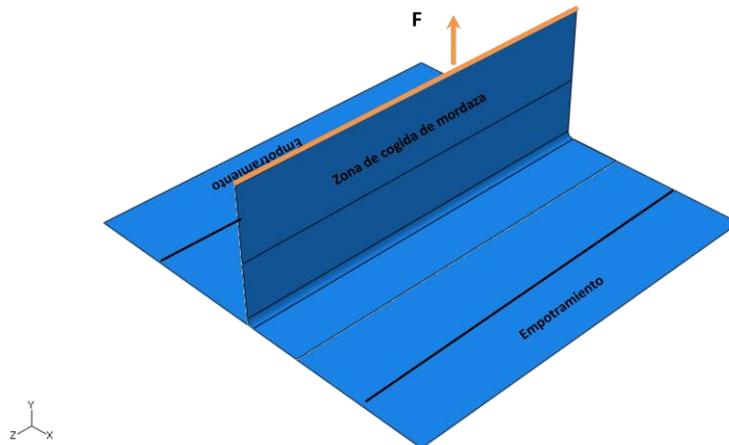


Fig. 1.6 .Condiciones de contorno de las probetas tipo GERM.

Durante los ensayos, se monitorizaron las deformaciones en algunos puntos de las probetas mediante la colocación de bandas extensométricas y se controló la evolución de la grieta frente a la carga así como las cargas de aparición de la grieta y fallo de la probeta.

Posteriormente, en el análisis de resultados se estudió el aspecto de la superficie de rotura buscando modos preferentes de fallo y se compararon los resultados obtenidos en todas las probetas.

1.6.- Organización del Proyecto:

El documento está dividido en 6 capítulos (incluyendo el de la Introducción), cuyos contenidos principales son:

- **Capítulo 2:** en él se explica el proceso de diseño y fabricación de las probetas. Se incluyen planos de las probetas y de los útiles usados. Al final del capítulo, se muestra un diagrama de flujo con el proceso de fabricación resumido.

- **Capítulo 3:** en este capítulo se detalla la preparación de las probetas para el ensayo (colocación de las bandas extensométricas) y la adaptación de la máquina de ensayo a las condiciones de contorno necesarias para este caso (diseño de un útil específico para los ensayos).

- **Capítulo 4:** en esta parte se recogen todos los resultados obtenidos en los diferentes ensayos. Se muestran fotos de las probetas tras el ensayo y gráficos que muestran las mediciones de las bandas extensométricas. También se proporciona información acerca de la evolución general del ensayo. Al final del capítulo, se hace una comparación entre los resultados obtenidos en los diferentes ensayos.

- **Capítulo 5:** aquí se presentan las conclusiones obtenidas durante la fabricación y ensayo de las probetas. También se incluye un apartado de desarrollos futuros donde se recogen algunos aspectos que pueden ser estudiados en futuros trabajos de investigación.

- **Capítulo 6:** en este capítulo se incluye un presupuesto estimativo de los costes de la realización del proyecto incluyendo tanto los materiales empleados como las horas de trabajo.

Al final del documento se han incluido también dos anexos. En el **Anexo 1** se incluye la hoja de especificaciones del adhesivo utilizado para la unión del rigidizador con al piel. En el **Anexo 2** se incluyen los planos de las probetas fabricadas, la posición de las bandas extensométricas y las dimensiones de los útiles de fabricación y ensayos.