



UNIVERSIDAD
POLITECNICA
DE VALENCIA



TRABAJO DE FIN DE GRADO

**ESTUDIO DE LAS FUERZAS AERODINÁMICAS
SOBRE ESTRUCTURAS DE PLACAS
SOMETIDAS A FLAMEO**

Autor

Javier Illueca Hernández

Tutor

Vicente Dolz Ruiz

**Grado en Ingeniería Aeroespacial
Universidad Politécnica de Valencia
Escuela Técnica Superior de Ingeniería del Diseño**

Valencia - Septiembre de 2017

Agradecimientos

En primer lugar me gustaría agradecer la labor de mi tutor Vicente Dolz durante la realización del proyecto. Por un lado, resaltar la oportunidad que me ha brindado para poder llevar a cabo este estudio que resultaba de mi interés. Por otro, destacar tanto la ayuda como las facilidades que me ha aportado durante la evolución del mismo, lo cual ha sido clave para su correcto desarrollo.

En segundo lugar, mencionar el trabajo de mi compañero Jordi García, ya no solo a nivel académico sino también a nivel personal, ya que su presencia ha sido otro de los factores importantes en la realización del proyecto.

Finalmente, agradecer también el apoyo recibido por parte de mi familia y mi novia, quienes me animaron y me dieron fuerzas en todo momento. Además, me gustaría aprovechar la ocasión para dedicar el proyecto a mi padre, Carlos Illueca, que me enseñó a no rendirme y siempre fue un ejemplo para mí.

“Si tú no trabajas por tus sueños, alguien te contratará para que trabajes por los suyos”.

Steve Jobs

Resumen

Dentro del campo de la Aeroelasticidad, el fenómeno del flameo es el más importante y el más difícil de predecir y su estudio resulta clave en las fases previas de diseño de una aeronave debido a las catastróficas consecuencias que puede tener a nivel estructural. Es por ello por lo que este fenómeno se ha escogido como motivo principal del proyecto.

Así, se ha llevado a cabo un estudio experimental con el túnel de viento para ver las condiciones en las que una estructura compuesta por dos placas articuladas llegaba al punto de flameo y para apreciar el movimiento oscilatorio que describía. También se ha procedido a realizar una comparación con el caso de una sola placa, para ver qué influencia ejercía esa placa añadida en el borde de fuga de la estructura en el comienzo del flameo. Finalmente, se ha estudiado la sensibilidad del caso mediante la variación de algunos parámetros de interés para ver cómo afectan en la entrada en condiciones de flameo.

Índice general

Índice de figuras	III
Índice de tablas	IV
Lista de Símbolos	V
1. Introducción	1
1.1. Consideraciones generales	1
1.2. Antecedentes	2
1.3. Objetivos	3
1.4. Metodología	4
1.5. Motivación	5
1.6. Justificación	6
1.7. Estructura del documento	9
2. Fundamentos teóricos	11
2.1. Aeroelasticidad	11
2.2. Aerodinámica	14
2.2.1. Elementos hipersustentadores	16
2.3. Túnel de viento	20
2.3.1. Descripción del diseño	20
2.3.2. Instrumentación	25
3. Método experimental	27
3.1. Montaje de la estructura y material empleado	28
3.2. Obtención de resultados	36
3.3. Comparación con el caso de placa plana simple	39
3.3.1. Estructura articulada y placa plana de $c = 12\text{ cm}$	40
3.3.2. Estructura articulada de $c = 18$ y 9 cm y placa plana de $c = 18\text{ cm}$	43
4. Estudio Paramétrico	45
4.1. Variación de la posición del Centro de Gravedad	46
4.2. Variación del alargamiento	48
4.2.1. Variación de la cuerda de ambas placas en igual proporción	49
4.2.2. Variación de la cuerda de la placa trasera	50

5. Presupuesto económico	55
5.1. Presupuesto del estudio experimental	56
5.2. Presupuesto de salarios y tiempo dedicado por el alumno	57
5.3. Presupuesto total	58
6. Conclusiones y trabajos futuros	59
6.1. Conclusiones	59
6.2. Trabajos futuros	62
Bibliografía	66

Índice de figuras

1.1. Flujo de aire en un perfil alar y ala de una aeronave.	2
1.2. Parque eólico	6
1.3. Puente de Tacoma Narrows destruido	7
1.4. Ecoflyer JK 05	8
2.1. Triángulo de Collar	12
2.2. Descomposición de fuerzas aerodinámicas en un perfil alar	14
2.3. Curva de sustentación	15
2.4. Transición de capa límite laminar a turbulenta	17
2.5. Desprendimiento de capa límite con incremento de ángulo de ataque	17
2.6. Distintos tipos de flaps	18
2.7. Vista de un ala con los flaps y slats desplegados	19
2.8. Túnel de Viento Subsónico cerrado	20
2.9. Zona de medida del túnel de viento	21
2.10. Campana de contracción del túnel de viento	22
2.11. Ejemplos de difusores del túnel de viento	22
2.12. Acabado final de cada uno de los codos del túnel de viento	23
2.13. Ventilador del túnel de viento	24
2.14. Conjunto completo del ventilador	24
2.15. Disposición de las partes del túnel de viento cerrado	25
2.16. Rastrillo de tubos de pitot	26
3.1. Estructura de placas articuladas en túnel de viento	28
3.2. Representación de la Ley de Hooke	30
3.3. Caracterización experimental del muelle	31
3.4. Cámara FastCam APX de la marca Photron	33
3.5. Disposición de la estructura articulada	35
3.6. Secuencia de movimientos de la estructura articulada en condiciones de flameo	36
3.7. Placa plana de $c = 12$ cm en el túnel de viento	40
3.8. Secuencia de movimientos de la placa plana en condiciones de flameo	41
4.1. Accidente del vuelo 628 de LACSA	46
4.2. Secuencia de movimientos de otra estructura articulada en condiciones de flameo	52
6.1. Contornos de presión en un perfil alar con estudio CFD	64
6.2. Winglet del ala de un Airbus A350 XWB	64

Índice de tablas

3.1. Constante de rigidez de los muelles	32
3.2. Masas de la estructura	34
3.3. Parámetros característicos de placa plana	34
3.4. Parámetros característicos de placa plana	35
3.5. Punto de flameo de estructura de placas articuladas de $c = 12$ cm	39
3.6. Punto de flameo para estructura articulada y placa plana de $c = 12$ cm	42
3.7. Parámetros característicos de cada estructura	44
3.8. Punto de flameo para estructura articulada de $c = 18$ cm y 9 cm y placa plana de $c = 18$ cm	44
4.1. Parámetros característicos de cada estructura articulada variando X_{cdg}	47
4.2. Punto de flameo para cada estructura articulada variando X_{cdg}	47
4.3. Parámetros característicos de cada estructura articulada variando AR	49
4.4. Punto de flameo para cada estructura articulada variando AR	49
4.5. Caracterización de cada estructura articulada variando la cuerda de la placa trasera	51
4.6. Punto de flameo de cada estructura articulada variando la cuerda de la placa trasera	53
5.1. Presupuesto para el montaje de la estructura	56
5.2. Presupuesto para los equipos de medida	57
5.3. Presupuesto de salarios	58
5.4. Presupuesto total del proyecto	58

Lista de Símbolos

Símbolos latinos.

AR	—	Alargamiento de la estructura (-)
b	—	Envergadura de la estructura (m)
c	—	Cuerda aerodinámica de la estructura (m)
C_L	—	Coefficiente de sustentación (-)
D	—	Fuerza de resistencia (N)
F	—	Fuerza aplicada en el extremo del muelle (N)
f_f	—	Frecuencia de flameo (Hz)
$h(t)$	—	Desplazamiento vertical de la estructura (m)
k	—	Constante de rigidez del muelle a flexión (Nm^{-1})
L	—	Fuerza de sustentación (N)
$l(t)$	—	Desplazamiento horizontal de la estructura (m)
m_{total}	—	Masa total de la estructura (kg)
m_{placa}	—	Masa de una placa (kg)
$m_{arandela}$	—	Masa de la arandela adicional (kg)
P	—	Potencia del ventilador (kW)
R	—	Fuerza resultante (N)
Re	—	Número de Reynolds (-)
r_e	—	Radio exterior de la arandela (m)
r_i	—	Radio interior de la arandela (m)
t	—	Espesor de la placa (m)
T_f	—	Periodo de flameo (s)
V_f	—	Velocidad de flameo (ms^{-1})
V_∞	—	Velocidad del flujo no perturbado (ms^{-1})
x_0	—	Longitud del muelle a flexión sin aplicar ninguna fuerza (m)
x	—	Longitud del muelle a flexión tras aplicar una fuerza (m)

Símbolos griegos.

α	—	Ángulo de ataque ($^\circ$)
$\alpha(t)$	—	Giro de la placa delantera ($^\circ$)
$\beta(t)$	—	Giro de la placa trasera ($^\circ$)
μ_∞	—	Viscosidad dinámica del aire (Nsm^{-2})
ρ_∞	—	Densidad del flujo no perturbado (kgm^{-3})

Capítulo 1

Introducción

1.1. Consideraciones generales

La realización de este proyecto se enmarca dentro de la disciplina de la *Aeroelasticidad*, así como de los diferentes campos que abarca esta rama de la ingeniería aeroespacial, la cual estudia la interacción entre las fuerzas inerciales, elásticas y aerodinámicas. Partiendo de ello, cabe destacar la importancia de este ámbito a nivel estructural ya que dichas fuerzas son causantes de inestabilidades que pueden llevar a la rotura parcial o total de la propia estructura.

Como es lógico pensar, en toda fase de diseño de una aeronave se requiere de la implementación de un estudio aeroelástico con el fin de evitar y prevenir posibles problemas relacionados con esta causa, así como de conocer el comportamiento de la misma aeronave y sus componentes ante diferentes situaciones marcadas por las condiciones de vuelo y operación. Para ello, se desarrollan modelos teóricos del avión que posteriormente se validan con ensayos en tierra o en vuelo.

Por otro lado, el ala de una aeronave es un cuerpo aerodinámico compuesto por un perfil aerodinámico, que puede variar a lo largo de la misma o atender a distintos criterios según el propósito que se persiga en el diseño, envolviendo a uno o más largueros que sirven de refuerzo estructural. Es la parte de la propia aeronave que más influencia ejerce en la sustentación que ésta experimenta, debido a la diferencia de presiones que es capaz de generar entre su cara superior (extradós) y su cara inferior (intradós) cuando se encuentra inmersa en un flujo de aire a cierta velocidad.



Figura 1.1: Flujo de aire en un perfil alar y ala de una aeronave.

En ese sentido, la mayoría de alas se les dotan de dispositivos hipersustentadores para asegurar una operación lo suficientemente alejada de la zona de entrada en pérdida. El fin de estos es aumentar la cuerda aerodinámica y la curva del perfil alar, modificando la geometría del perfil de tal modo que la velocidad de entrada en pérdida durante diferentes fases del vuelo se reduzca de modo significativo permitiendo un vuelo más lento. De este modo permite al avión volar a velocidades más bajas en las fases de despegue, ascenso inicial, aproximación y aterrizaje aumentando su coeficiente de sustentación.

Una clasificación muy general puede hacerse en dos grandes grupos: flaps y slats. Los primeros se encuentran en el borde de salida del ala en su gran mayoría y se deflexan hacia abajo en uno o más ángulos cambiando de esta forma la curvatura del perfil alar, la superficie alar y el ángulo de incidencia, lo que se traduce en un aumento de la sustentación y de la resistencia. Por su parte, los slats están situados en el borde de ataque del ala y al deflexarse canalizan hacia el extradós una corriente de aire de alta velocidad que aumenta la sustentación permitiendo alcanzar mayores ángulos de ataque sin entrar en pérdida.

Por ello, a través de este proyecto se ha trabajado con una estructura articulada compuesta por placas planas, con el fin de simular y obtener un modelo compuesto por un ala y su correspondiente flap a lo largo de la envergadura de la misma. Así, se podrá observar que tipo de respuesta ofrece esta configuración en el estudio a realizar.

1.2. Antecedentes

En este apartado se han de abarcar aquellos trabajos en los que se ha tratado el tema del flameo de estructuras y que han servido de apoyo para la realización de este proyecto. Así, se ha podido contar con diversas fuentes, necesarias para el desarrollo del mismo, las cuales van a ser descritas brevemente.

Por un lado, se ha de destacar el temario impartido por la profesora Ivana Guinot Panadero de la asignatura de *Aeroelasticidad* durante el primer cuatrimestre del cuarto curso en la Universidad Politécnica de Valencia y proporcionado por el profesor Mario Lázaro Navarro. El contenido teórico del mismo hace referencia a la aeroelasticidad dinámica, tratando el flameo

de perfiles en régimen incompresible, y ha resultado esencial para la comprensión de conceptos clave en la evolución del proyecto y su posterior implantación a la hora de aportar las explicaciones pertinentes.

Por otro lado, se han de resaltar dos trabajos de fin de grado realizados por alumnos de Ingeniería Aeroespacial de especial importancia para la conclusión de éste. En ambos, se estudia el fenómeno del flameo en una placa plana a nivel teórico y experimental para poder comparar resultados obtenidos y establecer una serie de conclusiones.

De una mano, el trabajo de María del Carmen García Aguilar, donde también se observa el comportamiento de un perfil aerodinámico, y cuya finalidad reside en conocer las condiciones en las que se produce el flameo en este tipo de estructuras. Así, se podría evitar la aparición de este fenómeno, ya que en ciertas partes de la aeronave puede llegar a resultar bastante dañino. Además, también se buscaría controlar la conocida velocidad de flameo con el objetivo de generar electricidad mediante aerogeneradores sin aspas, más conocidos como *Vortex Bladeless*. Así, este trabajo ha sentado las bases y ha fijado las directrices a seguir para el desarrollo óptimo del proyecto.

De otra, el trabajo de mi compañero en la realización del proyecto en cuestión Jordi García Martínez, cuya investigación pretendía la validación del modelo a tratar y la realización de un estudio paramétrico para ver como afectaba la modificación de ciertos parámetros que caracterizan la placa en la aparición del fenómeno del flameo.

1.3. Objetivos

En lo referente a los objetivos marcados en este proyecto, el principal viene marcado por el estudio del fenómeno del flameo sufrido por una estructura determinada (placas planas articuladas). El flameo se entiende como una inestabilidad aeroelástica por la cual una estructura al vibrar absorbe energía del fluido circundante, de tal forma que es incapaz de disipar en un ciclo de vibración toda la energía que absorbe. Es un efecto bien conocido y en todos los aviones fabricados se trata de asegurar que en ninguna condición de vuelo se esté durante un tiempo prolongado en la llamada velocidad de flameo evitando así una rotura o un desgaste estructural.

Por ello, la finalidad del documento reside en la investigación acerca de este suceso para incrementar en el conocimiento del mismo, el cual ya se había iniciado durante la asignatura de *Aeroelasticidad*. En este sentido, para el estudio experimental del caso se ha trabajado con el túnel de viento cerrado de la UPV, donde se ha integrado la estructura montada y se ha dispuesto de todo el equipamiento necesario de forma que se pudieran apreciar las condiciones ante las cuales se daba el propio flameo.

Por otro lado, también se han comparado de forma experimental los resultados obtenidos para la estructura en cuestión con los hallados mediante una conformada tan solo por una placa plana, con el fin de apreciar la influencia de esa parte articulada de la misma.

Además, se ha realizado un pequeño estudio paramétrico variando algunas variables para

ver su repercusión en este fenómeno tales como la cuerda geométrica o la posición del centro de gravedad, los cuales se sabe que ejercen una cierta influencia según la investigación previa realizada acerca de casos relacionados con el flameo.

En resumen, el propósito del proyecto incide en el propio flameo producido en una estructura compuesta por dos placas planas articuladas, teniendo por objetivos:

1. Investigar experimentalmente sobre el fenómeno del flameo en una estructura dada.
2. Apreciar la influencia que ejerce la parte articulada de la estructura mediante la comparación con el caso de una sola placa.
3. Estudiar el impacto que tienen algunos parámetros en la aparición del flameo.

1.4. Metodología

Lo primero de todo es definir de forma breve como se ha realizado el modelado de la estructura a tratar. En este caso, se han empleado dos placas de espuma *deprom* unidas mediante cinta americana dejando un centímetro de juego entre ambas para permitir la articulación del movimiento. Asimismo, el centro de gravedad de la estructura se fija pegando una arandela en la parte trasera de la primera de las placas que incide en el flujo de aire para dotarla de más peso y poder desplazarlo según se quiera. Además, lo que se busca es el diseño de una estructura que contemple tres grados de libertad: el giro de ambas placas y el desplazamiento vertical. Para ello, se sujeta la estructura comentada anteriormente mediante doce muelles, los cuales quedan fijados mediante doce ventosas a las paredes de la cámara de pruebas - Figura 3.1. Sin embargo, una vez se realizó el experimento, se pudo apreciar que el movimiento de la estructura no atendía exactamente a los grados de libertad fijados de forma previa, pero se mantuvo dicho modelado, ya que para el estudio del caso de una sola placa plana también se operó de esta manera.

De este modo, la estructura se introduce en el túnel de viento para ver los efectos de la corriente de aire incidente. Por ello, mediante el tubo de Pitot instalado en el propio túnel, podemos saber que condiciones tenemos dentro del mismo. Así, a medida que aumentamos la velocidad del flujo, la estructura comienza a oscilar entrando en estado de flameo, llegando a un punto en el que la velocidad es tal que la estructura se vuelve inestable siendo esta la *velocidad crítica de flameo*. Para poder determinar el valor exacto de dicha velocidad se procede de la siguiente manera: se incrementa poco a poco la frecuencia de rotación del motor del ventilador del propio túnel de viento para así ir aumentando la velocidad del flujo incidente y ver cuando se produce esa inestabilidad aeroelástica.

Además, como el tubo de Pitot se encuentra en el borde de fuga de la estructura, para evitar medidas erróneas debido a la perturbación del flujo, también se han tomado con la cámara de pruebas libre. Se ha introducido la frecuencia de rotación obtenida al apreciar la inestabilidad de la estructura anteriormente, para así adquirir valores de la presión dinámica con el flujo libre de perturbaciones y verificar que coinciden con los tomados con la estructura montada.

Para la realización del estudio paramétrico, simplemente se ha operado de la misma forma modificando las variables de interés.

Finalmente, para la comparativa con el caso de una sola placa se ha aprovechado el estudio de ese caso concreto que fue realizándose de forma simultánea al actual estudio, asegurando así que los ensayos se realizaban en las mismas condiciones.

1.5. Motivación

Como sabemos, la aviación es un campo que se encuentra en constante desarrollo debido a la demanda y la necesidad del mismo. La evolución de este se ha nutrido de diferentes avances tecnológicos que han permitido la optimización cada vez en mayor medida de las prestaciones ofrecidas por las aeronaves, tales como una reducción en el gasto de combustible, pesos más ligeros o menor repercusión medioambiental, entre otros.

Lo que está claro es que los nuevos avances siempre implican nuevos problemas que solventar. Inicialmente, y como es lógico pensar, las estructuras que conformaban las aeronaves resultaban más simples. Sin embargo, la innovación tiene un precio y, como ya se ha comentado anteriormente, trataremos de indagar en el campo de la aeronáutica que trata sobre la relación de los aspectos aerodinámicos y estructurales de una aeronave: la *Aeroelasticidad*. Además, y de forma más concreta, en este documento se estudia el fenómeno del flameo, el cual es el más difícil de predecir y a su vez el más importante.

El flameo se define como el fenómeno por el cual estructuras aeronáuticas colapsan por vibraciones inestables. Es una vibración autoinducida que ocurre cuando una superficie sustentadora se dobla bajo una carga aerodinámica. En su forma más inofensiva puede aparecer como un zumbido en la estructura de la aeronave, pero en la más violenta se puede detonar incontrolablemente a gran velocidad y causar grandes daños o incluso la destrucción de la aeronave. También tiene relación con las frecuencias de excitación de la estructura, es decir, cuando la frecuencia de excitación del flujo incidente coincide con la frecuencia natural de la estructura, se produce un fenómeno conocido como resonancia que da lugar a dicha inestabilidad aeroelástica.

Además, es sabido que en la industria aeronáutica el flameo se plantea como un efecto sobre el cual es necesario tener toda la información sobre las condiciones y velocidades críticas a las que se produce para minimizarlo dentro de lo posible y que no suceda. En este sentido, la predicción del flameo se ha producido por medios puramente teóricos, por computación analógica, mediante experimentos con el túnel de viento como en este caso o con modelos dinámicos de cohetes a escala, así como con pruebas de vuelo a gran escala. Evidentemente, la decisión de optar por un método u otro depende de diversos factores tales como el margen de seguridad que se puede anticipar al fenómeno del flameo, el rango de números de Mach a estudiar, el número de diferentes configuraciones estructurales de masa a analizar, las condiciones económicas, etc.

Por ello, debido al hecho de que el flameo es considerado como uno de los puntos críticos en el diseño de estructuras aeronáuticas y que durante años y en la propia actualidad, los ingenieros han pretendido investigar de una forma más incisiva la aparición del mismo con el fin de controlarlo y evitar los daños derivados, se ha procedido a la realización del estudio en cuestión.

Por otro lado, cabe destacar que parte de la motivación de este trabajo reside en el hecho de poder profundizar en mayor medida, y ya no sólo a nivel teórico, en un fenómeno de tal magnitud tratado en la asignatura de *Aeroelasticidad*. Y es que a veces resulta un tanto insatisfactorio tratar ciertos conceptos de forma puramente teórica, ya que lo realmente interesante es poder apreciarlo en primera persona y ver el comportamiento real de la estructura a tratar para adquirir un conocimiento visual de dicho fenómeno.

Finalmente, mencionar que el flameo no solo abarca temas relacionados con el diseño de superficies sustentadoras en el ámbito aeronáutico, si no que también puede extenderse a otros sectores de la ingeniería como puede ser el diseño de las turbinas de un parque eólico o la construcción de puentes colgantes, lo que otorga a este fenómeno mayor importancia para su estudio.



Figura 1.2: Parque eólico

1.6. Justificación

Como ya se ha comentado, el estudio del flameo es uno de los puntos clave en las fases de diseño de una aeronave debido a la vital importancia que tiene y a lo crítico que puede resultar este estado a nivel estructural, llegando a provocar roturas catastróficas si no se ha llevado a cabo un desarrollo adecuado de dicho estudio.

Evidentemente, la implicación en este fenómeno se ha incrementado fruto de los diversos desastres que ha causado en diferentes ocasiones. Como también se ha comentado, el flameo no solo ha tenido implicaciones en el campo de la aeronáutica, sino que se ha extendido a otros ámbitos relacionados con la ingeniería. Así, se desarrollan dos accidentes producidos en distintas épocas en los que se ha apreciado la aparición del flameo, dejando graves consecuencias en su medida.

Puente de Tacoma Narrows, 7 de Noviembre de 1940

Probablemente el accidente producido en el puente de Tacoma Narrows (Seattle) sea el ejemplo más conocido debido a este fenómeno por su importancia histórica y su repercusión en el desarrollo de la ingeniería de puentes.

El puente de Tacoma Narrows tenía una longitud de 1600 *m* y una distancia de 850 *m* entre los soportes. Construido con vigas de acero ancladas a grandes bloques de hormigón era el tercer puente colgante más grande del mundo cuando se inauguró. Actualmente, ya que fue reconstruido en 1950, es parte de la carretera Washington State Route 16 en su paso a través de Tacoma Narrows de Puget Sound desde Tacoma a Gig Harbor.

Habían pasado solo unos meses desde la inauguración del puente y todo parecía normal. Hacía buen tiempo y soplaba una ligera brisa constante con una velocidad de unos 65 *km/h*. Así, el puente comenzó a oscilar de manera peligrosa y tras una hora de sacudidas terminó por desplomarse en el agua quedando completamente destrozado.

De esta manera, los ingenieros se preguntaron el por qué se había producido esta catástrofe. La respuesta yacía en el hecho de que se produjo un colapso estructural producido por el viento al manifestarse el fenómeno físico del flameo, causado a su vez por la resonancia mecánica originada por los remolinos de viento. En este caso, la ligera velocidad del viento y la frecuencia del mismo coincidieron con la frecuencia natural del puente, por lo que la energía transferida se maximizó de tal manera que las ondas lo balancearon hasta colapsarlo. Evidentemente se produjeron errores en la fabricación de este puente y las lecciones aprendidas a partir de este desastre sirvieron como punto de referencia y permitieron mejorar considerablemente la seguridad en la construcción de nuevos puentes colgantes. Afortunadamente no hubo ninguna víctima.



Figura 1.3: Puente de Tacoma Narrows destruido

Aeronave EC-ZOR, 25 de Marzo de 2005

Otro ejemplo de accidente debido al flameo es el que se produjo en un vuelo de recreo en el aeródromo de Igualada-Ódena (Barcelona). Está claro que no tuvo tanta repercusión en el mundo de la ingeniería como el accidente anteriormente descrito, pero destacar la importancia de que todavía en 2005 se siguen produciendo incidentes debido a este fenómeno, lo que pone de manifiesto la vital importancia del conocimiento y el desarrollo del mismo en las diferentes fases de diseño, en este caso sí, de una aeronave.

Se trata de un de modelo Ecoflyer JK 05 con una envergadura alar de 11.56 *m* que despegó en un vuelo privado después de haber realizado el repostado de combustible, chequeo prevuelo y calentamiento de motor durante unos 15 minutos. A bordo se encontraban un piloto y un pasajero que no tenía conocimientos aeronáuticos.

Previa información por radio, el piloto realizó una pasada lenta por encima de la pista para posteriormente alejarse de la misma y del circuito del tráfico. Al cabo de un tiempo, se dispuso de nuevo a hacer otra pasada por la pista, cuando en el tramo de corta final, y a unos 30 *m* de altura, el ala izquierda se desprendió en vuelo y la aeronave se precipitó al suelo, incendiándose de inmediato. Los dos ocupantes fallecieron a consecuencia del impacto.

Tras analizar los daños, se apreció que el desprendimiento del ala posiblemente se produjo por la rotura sucesiva del montante de unión ala-fuselaje, del larguero trasero y del delantero. Tras estudiar otros casos con daños similares, se llegó a la conclusión de que se produjo la aparición de flameo en vuelo en el ala desprendida. A ello, hay que sumarle que la resistencia del ala era menor que la de diseño debido a algunos defectos en su fabricación como la falta local de resina que causó la delaminación entre las capas de tejido.



Figura 1.4: Ecoflyer JK 05

Como se ha visto, desde el punto de vista académico resulta imprescindible que los alumnos adquieran un cierto grado de conocimiento acerca de lo que implica el flameo ya no sólo dentro del campo de la aeronáutica, sino también sobre las repercusiones que tienen a nivel estructural en general.

1.7. Estructura del documento

En esta sección se va a hacer una breve descripción de las partes que consta el documento así como de su contenido. En ese sentido, la memoria consta de seis capítulos que tratan el fenómeno del flameo, además de los correspondientes índices tanto general como de tablas y de figuras, la lista de símbolos empleados y la bibliografía que recoge la documentación empleada para dar apoyo a la realización de este proyecto.

El primer capítulo es la introducción y se desglosa en siete secciones diferentes. La primera de ellas sirve para presentar algunos conceptos y aclaraciones previos que permiten contextualizar el estudio a realizar. La siguiente sección muestra los antecedentes informativos a este estudio, es decir, los proyectos y documentación que tratan el fenómeno del flameo que se han desarrollado en la UPV y han servido de apoyo en este en cuestión. Seguidamente se tienen los objetivos fijados para este proyecto, los cuales quedan claramente definidos y marcan las directrices a seguir. La siguiente sección abarca el modo en el que se ha operado con el fin de satisfacer los objetivos y como se ha producido el tratamiento experimental del caso. Después de ello, se exponen los motivos que han influido en la elección de este tema de trabajo. Asimismo, se justifica dicha elección mostrando dos casos en los que el flameo ha supuesto la diferencia en su desarrollo, mostrando así la vital importancia de saber controlar este fenómeno.

El siguiente capítulo abarca los fundamentos teóricos presentes en el proyecto. De una mano, se asientan aquellos conceptos que resultar ser fundamentales para la comprensión del estudio realizado. En ese sentido, se profundiza en los aspectos englobados por la aeroelasticidad, como rama de la aeronáutica que supone la base de este proyecto. Así, se realiza una explicación teórica del fenómeno del flameo para su mejor aplicación al caso experimental. Además, en lo referente a la aerodinámica como parte derivada de la aeroelasticidad, se presentan aquellos conceptos que ayuden al entendimiento de la interacción fluido-estructura, caracterizando también el flujo a tratar. Asimismo, se presenta la funcionalidad de los elementos hipersustentadores de una aeronave que se identifican con la placa trasera de la estructura articulada. Finalmente, se desarrolla tanto la composición del túnel de viento utilizado, así como su funcionamiento y la instrumentación empleada para llevar a cabo los diferentes ensayos.

El tercer capítulo resulta ser uno de los principales del proyecto, ya que no es otro que el que expone el estudio experimental del caso. Así, se hace un análisis exhaustivo de dicha parte experimental cuya finalidad era la de investigar el fenómeno del flameo. En este capítulo, primero se describen todos los materiales que se han utilizado para la realización del estudio, se justifica el por qué de su elección y se expone la función de cada uno de ellos. Además se presenta el equipamiento que ha servido de apoyo durante el mismo. Seguidamente, se presentan los resultados obtenidos para la configuración estudiada en su punto de flameo y la secuencia de movimientos descrita. Asimismo, se establece una comparación con el caso de una sola placa para poder ver la función que ejerce esa placa trasera que permite la articulación del movimiento. De este capítulo se extraen muchas observaciones que permitirán completar el apartado de conclusiones posteriormente.

El siguiente capítulo es el de estudio paramétrico del caso. En él, se analiza la sensibilidad del problema ante la modificación de variables como la posición del centro de gravedad de la

estructura o el valor del alargamiento. La elección de modificar estos parámetros se basa en la investigación previamente realizada y, como se podrá ver, es correcta pues afectan en gran medida al comportamiento de la estructura ante la entrada en condiciones de flameo. En una variante sobre la modificación del alargamiento alar, se aprovecha para variar la cuerda de la placa trasera de la estructura para ver hasta que punto ésta ejerce una cierta influencia.

En el quinto capítulo se estudian los aspectos económicos del trabajo. Concretamente se trata el coste que tendría la realización del proyecto, contando con el material y el equipamiento empleado, las horas de trabajo del tutor y del alumno y un 15 % de margen de beneficios fijados.

Finalmente, el último capítulo abarca tanto las conclusiones que se pueden extraer del estudio como el planteamiento de posibles trabajos futuros que se podría realizar en base a este. Así, por un lado se recogen las principales deducciones que se han obtenido en los capítulos de estudio experimental y análisis paramétrico y, por otro, se exponen una serie de proyectos que permitirían indagar más en el fenómeno del flameo y que estarían relacionados con el presente.

Capítulo 2

Fundamentos teóricos

Este capítulo sirve para aclarar aquellos conceptos relacionados con la materia desarrollada y para facilitar la comprensión del estudio realizado. De esta forma, se hará uso de las diferentes fuentes mencionadas en la bibliografía para poder extraer toda la información necesaria.

Por un lado, resulta obvio que se profundizará en el concepto de aeroelasticidad, ya que es la rama de la ingeniería aeronáutica sobre la cual trata este proyecto. Del mismo modo, se ha tratado el concepto de flameo ya que realmente es el principal motivo de estudio y el cual debe quedar completamente claro. Por otro, se han definido las características que engloba el concepto de aerodinámica, el cual también es esencial en este tipo de estudio, ya que se encuentra implícito en los fenómenos a tratar.

Además, se expone el papel de los elementos hipersustentadores de una aeronave y se realiza una pequeña clasificación para ayudar en la caracterización de la placa trasera. Finalmente se muestra la composición del túnel de viento y su funcionamiento.

2.1. Aeroelasticidad

Existen numerosas definiciones del concepto *aeroelasticidad*. Se sabe que es la ciencia que estudia la interacción entre las fuerzas inerciales, elásticas y aerodinámicas, siendo además la rama de la mecánica aplicada que estudia la respuesta de un sistema flexible en presencia de una corriente de aire. Fue definida por Arthur Collar en 1947 de la siguiente manera:

”La aeroelasticidad es el estudio de la interacción mutua que ocurre dentro del triángulo de las fuerzas inerciales, elásticas y aerodinámicas actuando sobre miembros estructurales expuestos a una corriente de aire, y la influencia de este estudio en el diseño”

Es necesario conocer el motivo de estudio de cada una de las tres vertientes que confluyen en este campo de la aeronáutica. Así, típicamente en un problema de *mecánica* se estudia un cuerpo rígido al que se le aplican unas cargas, para determinar sus reacciones o su movimiento. La *elasticidad y resistencia de materiales* se encarga de determinar las acciones internas y deformaciones de los cuerpos ante acciones externas. Asimismo, la *aerodinámica* estudia las acciones que aparecen sobre los cuerpos sólidos cuando existe un movimiento relativo entre éstos y el fluido que los baña.

Resulta interesante analizar la interrelación entre aeroelasticidad y las distintas ramas básicas de la ciencia relacionadas con ella. Así, cuando hablamos de aeroelasticidad, las fuerzas que aparecen sobre el sistema dependen de la deformación del mismo y por tanto de las acciones sobre él, por lo que el problema resulta estar acoplado y ha de resolverse en conjunto.

Como se ha comentado en el capítulo anterior, existe una gran importancia en conocer y dominar los conceptos relacionados con la aeroelasticidad y su impacto en las aeronaves, para poder prever en la fase de diseño los distintos fenómenos asociados y así evitar riesgos y aumentar la fiabilidad y la seguridad de la experiencia.

En cuanto a los fenómenos aeroelásticos se pueden diferenciar los estáticos y los dinámicos:

-Estáticos: en ellos intervienen tan solo las fuerzas elásticas y las aerodinámicas, por lo que las propiedades de la masa no son significativas en este tipo de fenómenos. Dentro de ellos distinguimos la divergencia, que ocurre cuando no se logra alcanzar una posición de equilibrio y las cargas aerodinámicas sobrepasan la rigidez estructural, teniendo efectos catastróficos sobre la aeronave. De hecho actualmente el fenómeno de la divergencia aeroelástica es el factor limitante para la velocidad de vuelo de una aeronave, ya que conforme aumenta la velocidad de vuelo también lo hacen las cargas aerodinámicas y por tanto la deformación. Además, tenemos la efectividad de mando, que se conoce como la sustentación que se obtiene y la que se obtendría si el sistema fuese rígido. Finalmente, la inversión de mando es la pérdida de la respuesta esperada de una superficie de control debido a la deformación estructural de la superficie principal.

-Dinámicos: en ellos, además de las fuerzas elásticas y aerodinámicas, también se consideran las fuerzas inerciales. Entre este tipo de fenómenos podemos distinguir el flameo, el cual va a ser tratado de forma exhaustiva durante el estudio, el bataneo, que es una inestabilidad de altas frecuencias causada por la desconexión de flujo de aire de un flap u oscilaciones de onda de choque, y el comportamiento ante ráfagas.

Todo ello queda representado mediante el triángulo de Collar:

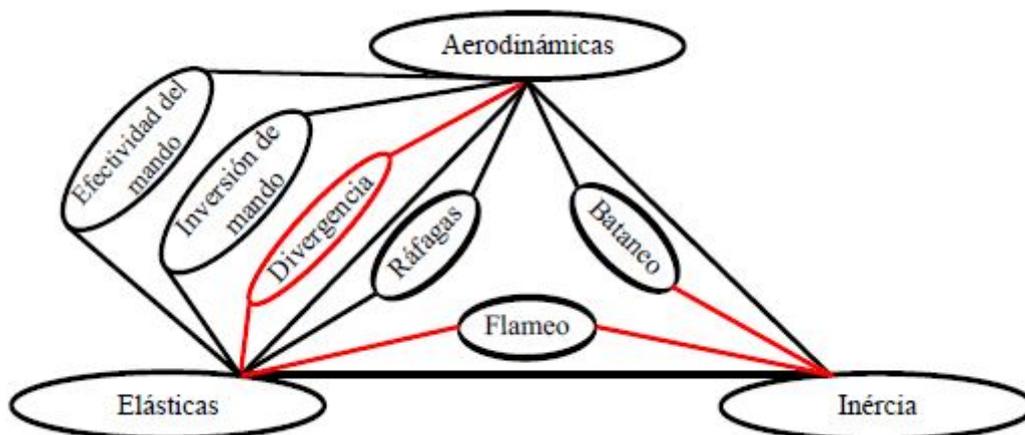


Figura 2.1: Triángulo de Collar

Fenómeno aeroelástico del flameo

Como se ha comentado, el fenómeno a tratar en este proyecto es el del flameo, debido a la importancia que tiene su estudio en la fase de diseño de una aeronave y demás tipos de estructuras. Es una inestabilidad aeroelástica que surge cuando las fuerzas aerodinámicas ejercidas sobre un objeto provocan un movimiento periódico natural. Este movimiento es retroalimentado en condiciones positivas, es decir, cuanta más vibración, más movimiento y carga aerodinámica y viceversa. A modo de definición, podemos tomar la aportada en *Introduction to Aircraft Aeroelasticity and Loads*, [4] :

“El flameo es una vibración autoexcitada inestable en la que la estructura extrae energía de la corriente de aire y, a menudo, da como resultado un fallo estructural catastrófico.”

También podemos encontrar otra descripción de este fenómeno, sobre el cual ya se ha hablado bastante en el capítulo anterior, en la definición aportada por *Y. C. FUNG* en su libro *An Introduction to the Theory of Aeroelasticity*, [6]:

“Considerando un ala en voladizo, sin barrido y sin alerón, montada en un túnel de viento con un pequeño ángulo de ataque y con un soporte rígido en la raíz, cuando la velocidad de flujo en el túnel de viento aumenta gradualmente, la velocidad de amortiguación de la oscilación de la superficie sustentadora alterada aumenta primero. Sin embargo, con un aumento adicional de la velocidad de flujo, se alcanza un punto en el que el amortiguamiento disminuye rápidamente. A la velocidad crítica de flameo, una oscilación puede apenas mantenerse con la amplitud constante. A velocidades de flujo algo por encima de la crítica, una pequeña perturbación accidental de la superficie sustentadora puede servir como desencadenante para iniciar una oscilación de gran violencia. En tales circunstancias, el perfil aerodinámico sufre de inestabilidad oscilatoria y se dice que flamea.”

El soporte empleado para el estudio de este fenómeno son las ecuaciones del movimiento de Lagrange. Para introducirlo, se puede plantear un problema con dos grados de libertad, el desplazamiento vertical y el giro alrededor del eje elástico, [1]: Estos grados de libertad representan las amplitudes de oscilación respecto a una determinada posición de equilibrio. El problema del flameo, como se ha comentado, es un problema de inestabilidad dinámica y por tanto su resolución se basa en el análisis de autovalores de cierto problema homogéneo. En nuestro caso, al contar con una estructura compuesta de placas articuladas, el número de grados de libertad será mayor, pero la metodología a emplear se puede extrapolar.

El hecho de tomar los dos grados de libertad iniciales se debe a que el movimiento de un ala experimentando el proceso de flameo tiene componentes de flexión y de torsión. Así, si se toma un sistema que sólo permite el grado de libertad referente a la flexión, no daría lugar al flameo. En cambio, si el grado de libertad representado fuera el de torsión sí que se produciría el fenómeno, siempre y cuando el ángulo de ataque del sistema empleado fuera próximo al de entrada en pérdida de la propia estructura. En este caso, habría que considerar también el movimiento de la placa que hace el papel de flap.

2.2. Aerodinámica

Una vez definidos los conceptos relativos a la aeroelasticidad, resulta esencial el hecho de indagar en lo que abarca el campo de la aerodinámica, debido a la importancia que tiene en este tipo de estudio, donde la interacción flujo-estructura es la que marca la aparición del fenómeno del flameo.

Así, como es sabido, la aerodinámica es la rama de la mecánica de fluidos que estudia las acciones que aparecen sobre los cuerpos sólidos cuando existe un movimiento relativo entre estos y el fluido que los baña, siendo este último un gas. Su fin es calcular las fuerzas y momentos que actúan sobre dichos cuerpos: fuerzas de sustentación y de resistencia al avance. Evidentemente, la aparición de fuerzas lleva consigo la aparición de momentos, los cuales también se han de tener en cuenta. De esta forma, la comprensión de los fenómenos de sustentación y resistencia fueron clave para el desarrollo de los perfiles alares, así como para la optimización de diseño de aviones y otros tipos de vehículos. La descomposición de fuerzas en un perfil alar es la siguiente:

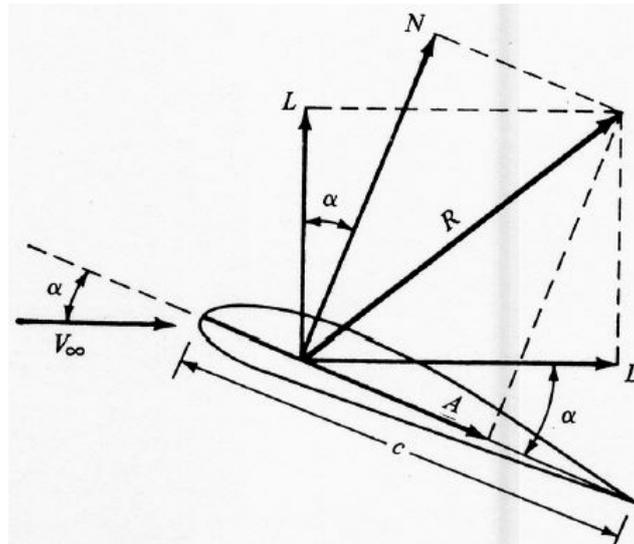


Figura 2.2: Descomposición de fuerzas aerodinámicas en un perfil alar

Donde V_∞ es velocidad del flujo no perturbado aguas arriba del perfil, L representa la fuerza de sustentación, D la fuerza de resistencia al avance, R la resultante, α el ángulo de ataque del perfil como el ángulo que forman la cuerda geométrica con la dirección del aire incidente y c la cuerda del perfil como la distancia entre el borde ataque y el de fuga del mismo.

Inciendo un poco más en el tema del ángulo de ataque α , es un parámetro que influye decisivamente en la capacidad de generar sustentación. Normalmente, al aumentar el ángulo de ataque se incrementa la sustentación hasta un cierto punto en el que ésta disminuye bruscamente, fenómeno conocido como entrada en pérdida. La dependencia de la sustentación con el ángulo de ataque se puede medir a través de un coeficiente de sustentación C_L cuya variación con α se puede apreciar en la siguiente imagen:

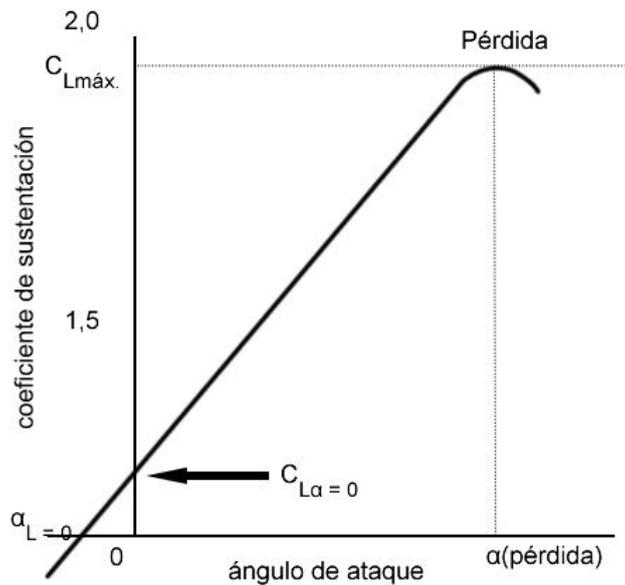


Figura 2.3: Curva de sustentación

Así, debido a la interacción directa entre el ángulo de ataque y la sustentación, el control del mismo es el mando primario de un avión. Hay que destacar que existen ciertos dispositivos hipersustentadores, sobre los cuales haremos más incapié posteriormente, que pueden incrementar el ángulo de ataque de entrada en pérdida.

Por otro lado, también hay que destacar las características del flujo que interviene en la realización del estudio. Como se ha comentado, se ha hecho uso del túnel de viento para ver la respuesta de la estructura articulada ante una corriente de aire incidente en el túnel de viento. De este forma, las condiciones de dicho flujo resultan esenciales para saber en qué marco se está analizando el proceso.

Por ello, primero hay que fijarse en las velocidades del flujo que se han empleado. En ese sentido, se ha trabajado con velocidades bajas, por lo que se puede considerar que la variación de densidad del fluido durante el flujo es nula y, por tanto, el fluido es incompresible. En consecuencia, el volumen de todas las porciones del fluido permanece inalterado sobre el curso de su movimiento.

Por otro lado, la segunda de las consideraciones acerca del fluido es que se trata de un fluido no viscoso, debido a las condiciones de análisis. Los fluidos reales siempre experimentan al moverse ciertos efectos debidos a las fuerzas de rozamiento o fuerzas viscosas. Así, la viscosidad es responsable de las fuerzas de fricción que actúan entre las capas del fluido. Por tanto, en nuestro caso, al considerar un fluido no viscoso lo estamos tomando como ideal, despreciando el efecto de los esfuerzos cortantes que el fluido genera sobre la superficie del perfil.

Finalmente, la última característica del flujo a mencionar es la del régimen en la que se encuentra. Para ello, pondremos atención en el número de Reynolds, el cual es un parámetro adimensional que relaciona las fuerzas de inercia con las viscosas de la siguiente manera:

$$Re = \frac{\rho_{\infty} V_{\infty} c}{\mu_{\infty}} \quad (2.1)$$

donde μ_{∞} es la viscosidad dinámica del fluido, ρ_{∞} su densidad, V_{∞} su velocidad y c la cuerda del perfil.

A pesar de que las velocidades de trabajo resulten relativamente bajas, al tomar el fluido como no viscoso, el número de Reynolds será lo suficientemente alto como para poder tomar el régimen como turbulento, en el cual el fluido se da en forma caótica, donde las partículas se mueven desordenadamente y sus trayectorias se encuentran formando pequeños remolinos periódicos no coordinados.

Cabe destacar que este tipo de consideraciones tiene repercusión sobre todo en el tratamiento teórico de las diferentes ecuaciones que regulan el movimiento del fluido, como puede ser la ecuaciones de conservación de la masa, de la cantidad de movimiento o de la energía por ejemplo.

2.2.1. Elementos hipersustentadores

En esta sección primero se han de aclarar algunos conceptos referentes a la aerodinámica también. Como se ha comentado, un aumento excesivo del ángulo de ataque puede conducir a la entrada en pérdida del perfil, o en este caso de la estructura compuesta por placas planas articuladas. Esa reducción de la sustentación es debida a un proceso conocido como separación de la capa límite.

La capa límite de un fluido es la zona donde el movimiento de este es perturbado por la presencia de un sólido con el que está en contacto, la zona donde la velocidad del fluido respecto al sólido en movimiento varía desde cero hasta un 99 % de la velocidad de la corriente no perturbada. El espesor de la capa límite en la zona del borde de ataque es pequeño, pero aumenta a lo largo de la superficie. Ésta puede ser laminar o turbulenta.

La capa límite laminar es inestable y se mantiene sólo en parte del perfil, ocurriendo la transición a turbulenta según las condiciones de Re y las perturbaciones presentes. En la capa límite turbulenta, el fluido se mueve en todas direcciones, disipa mayor energía, por lo que la fuerza de fricción derivada de ella es mayor, [2].

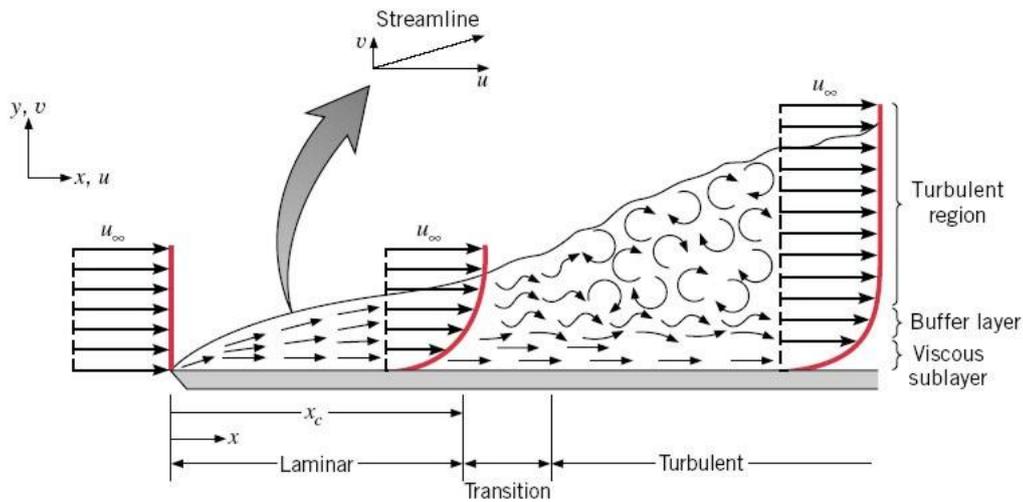


Figura 2.4: Transición de capa límite laminar a turbulenta

Así, con moderados ángulos de ataque el flujo de aire sigue el contorno de la superficie del ala y el punto de transición a turbulento se mantiene cercano al borde de salida (1). Sin embargo, a medida que el ángulo de ataque se incrementa el flujo de aire tiene mayor dificultad para seguir el contorno del ala debido al intenso cambio de dirección y el punto de transición se va desplazando hacia el borde de ataque. Cuando el ángulo de ataque es mayor que el ángulo crítico, el aire es incapaz de seguir el contorno del ala, el punto de transición está tan adelantado que apenas hay capa laminar y casi toda es turbulenta. En ese momento la presión diferencial se ha reducido y la resistencia se ha incrementado, hasta el punto de que no hay sustentación suficiente para soportar el peso del aeroplano y el ala entra en pérdida. Esquemáticamente queda representado según:

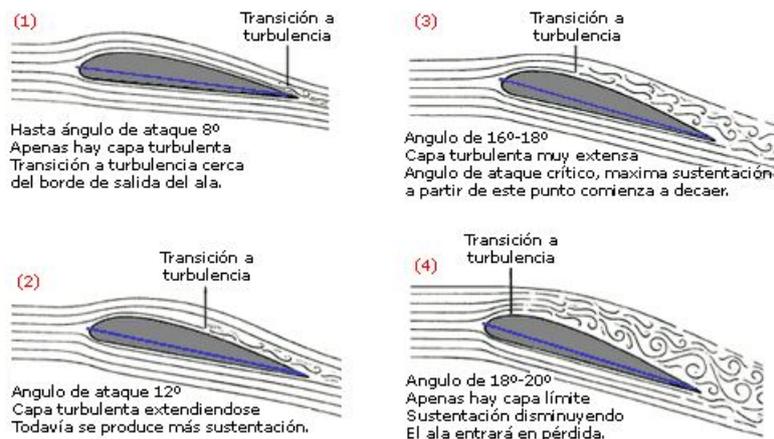


Figura 2.5: Desprendimiento de capa límite con incremento de ángulo de ataque

Una vez aclarados los conceptos de entrada en pérdida de un perfil alar, se está en disposición de describir qué son los elementos hipersustentadores y para qué se utilizan. Esto se debe a que para retrasar la entrada en pérdida a grandes ángulos de ataque es necesario recurrir a este tipo de dispositivos.

La hipersustentación se obtiene mediante un aumento de la curvatura, el control de la capa límite por inyección de cantidad de movimiento en la subzona de baja energía cinética o por succión de esa subzona o mediante el aumento del área efectiva mediante flaps que permiten aumentar la cuerda del perfil al deflectarse.

De esta manera, los dispositivos hipersustentadores están diseñados para aumentar la sustentación en determinadas fases de vuelo de la aeronave. Su fin es aumentar la cuerda aerodinámica y la curvatura del perfil alar, modificando la geometría del perfil de tal modo que la velocidad de entrada en pérdida durante fases de vuelo, como el aterrizaje o el despegue se reduzca de modo significativo, permitiendo un vuelo más lento que el de crucero.

Como se ha comentado en el anterior capítulo, una clasificación muy general puede hacerse en dos grandes grupos: flaps y slats, los cuales son dispositivos pasivos.

Los flaps están situados en el borde de salida del ala y se deflectan hacia abajo de forma simétrica en uno o más ángulos, con lo cual cambian la curvatura del perfil del ala, siendo ésta más pronunciada en el extradós y menos en el intradós, la superficie alar (en algunos tipos) y el ángulo de incidencia, todo lo cual da lugar a un aumento de la sustentación y en consiguiente de la resistencia. En general, deflexiones de flaps de hasta unos 15° aumentan la sustentación con poca resistencia adicional, pero deflexiones mayores incrementan la resistencia en mayor proporción que la sustentación. La utilización de flaps permite la posibilidad de volar a velocidades más bajas sin entrar en pérdida y emplear menores longitudes de pista en aterrizajes y despegues. Existen varios tipos, de los cuales destacan el flap sencillo, el flap Fowler, el flap Krueger, el flap zap, el flap ranurado y el flap de intradós:

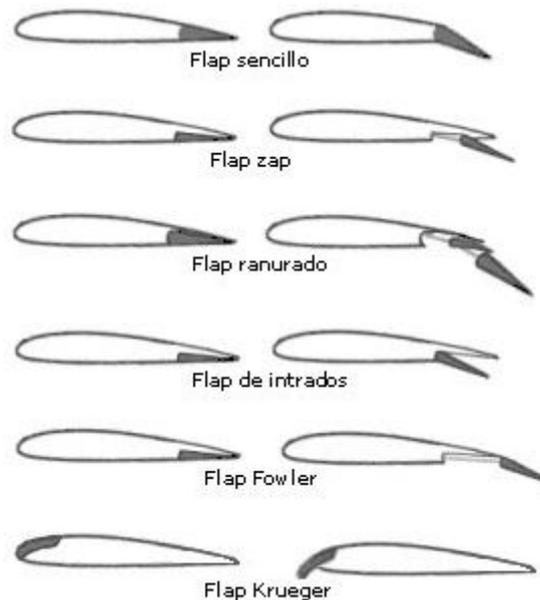


Figura 2.6: Distintos tipos de flaps

Por otro lado, los slats son dispositivos móviles situados en el borde de ataque que crean una ranura entre éste y el resto del plano. medida que el ángulo de ataque aumenta, el aire de alta presión situado en la zona inferior del ala trata de llegar a la parte superior del ala, dando

energía de esta manera al aire en la parte superior y por tanto aumentando el máximo ángulo de ataque que el avión puede alcanzar. Es un mecanismo de soplado que aporta cantidad de movimiento a la capa límite ayudando a vencer el gradiente adverso de presiones; así se retrasa el desprendimiento de la corriente con respecto al aumento del ángulo de ataque.

Los dispositivos hipersustentadores desplegados de forma conjunta en una aeronave se pueden apreciar en la siguiente imagen:



Figura 2.7: Vista de un ala con los flaps y slats desplegados

Todo ello resulta de especial importancia conocerlo, ya que la estructura que se ha modelado está compuesta por dos placas planas articuladas, donde una de ellas se puede decir que hace el papel de flap, en este caso de un flap sencillo, adherido a la placa principal con cierta holgura para permitir el movimiento de la misma.

Realmente, esa segunda placa no sería un flap propiamente dicho, ya que siempre va a formar parte de la estructura y no van a producirse las acciones de despliegue y repliegue como en un flap normal. Sin embargo, sí que se apreciará ese aumento de la cuerda con esa segunda placa y ese comportamiento característico de la capa límite a lo largo de la superficie cuando el flap está desplegado, también debido al juego permitido en la unión de las dos placas, por lo que, al fin y al cabo, dicha placa funcionaría como un flap y, por tanto, la información aportada era necesaria para el entendimiento del proceso.

2.3. Túnel de viento

Como se ha comentado, para el estudio experimental del fenómeno del flameo se ha hecho uso del túnel de viento con el que cuenta la Universidad Politécnica de Valencia, que permite investigar en fenómenos aerodinámicos en condiciones subsónicas, tanto en comportamiento como en la concentración de cargas por acción del viento.

Un túnel de viento es una herramienta de investigación desarrollada para ayudar en el estudio de los efectos del movimiento del aire alrededor de objetos sólidos. Así, se simulan las condiciones que experimentará el objeto de la investigación en una situación real, donde el objeto o modelo permanece estacionario mientras se propulsa el paso de aire alrededor de él.

Como base instrumental, en la zona de medida, el túnel de viento incorpora un tubo de pitot de medida electrónica que facilita la lectura de la velocidad del aire al usuario en toda la sección de la zona de medida, por otra parte también el usuario cuenta con un medidor de hilo caliente con el cual puede saber cuál es el valor de turbulencia generada y si se necesita, de acuerdo a la exigencia del ensayo, estabilizar el flujo.

Así, en esta breve introducción se presenta el túnel de viento como una herramienta importante para realizar y comprender una gran parte de temas relacionados sobre la aerodinámica, la mecánica de fluidos, la transmisión de calor, así como de ramas derivadas de estas, y que se logra establecer una vinculación entre la realidad y la simulación mediante pequeños modelos a escala, así como también con los modelos teóricos o matemáticos. Pero para que funcione se necesita que el túnel tenga un diseño preciso y fiable, por lo que se especificarán tanto el diseño que tiene como la instrumentación empleada.

2.3.1. Descripción del diseño

Para introducir esta sección, se muestra una imagen de la estructura completa del túnel de viento empleado:

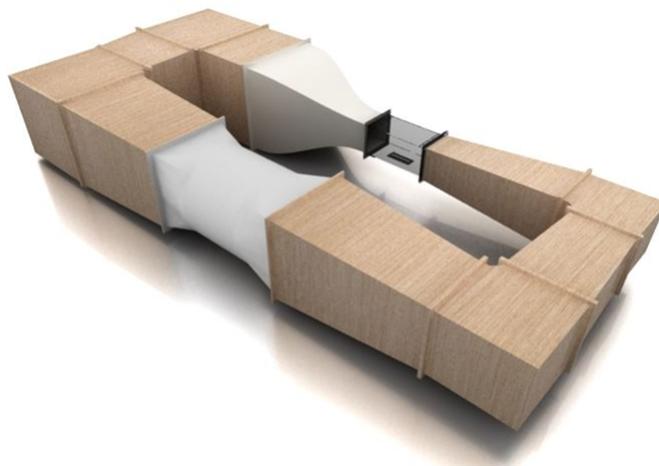


Figura 2.8: Túnel de Viento Subsónico cerrado

En el diseño de un túnel de viento es muy importante tener en cuenta varias variables que pueden afectar a su funcionamiento. Del propio diseño depende que se puedan conseguir buenos resultados en las mediciones, que los mismos sean fiables y coherentes con la realidad.

Zona de medida

Propiamente dicho, en esta zona es donde se realizan los distintos ensayos. De esta forma, existe un compromiso entre colocar la mayor contracción de área posible y albergar un espacio necesario para la mayor versatilidad del túnel. Para ello, ha sido construida en metacrilato, porque se requiere un material transparente pero a su vez rígido, ligero, duro y resistente. La zona de medida tiene forma de urna donde se emplazan distintos agujeros de diferentes diámetros por donde se introducen las sondas de los tubos de pitot o bien se fijan los elementos a medir. Además, cuenta con una sección transversal cuadrada de 44 *cm* y una longitud de 1 *m*. Un esquema de la zona de medida es el siguiente:



Figura 2.9: Zona de medida del túnel de viento

Campana de contracción

Este elemento corresponde a la parte más importante del túnel pues supone la piedra angular de esta herramienta, ya que en base a las características que ofrece se acoplan el resto de elementos que componen el propio túnel. Su función principal reside en disminuir el coeficiente de turbulencia.

La eficiencia de esta pieza aumenta al incrementar la relación existente entre las áreas de salida y de entrada, siendo ésta 9:1, pero también hay que prestar atención a la forma de su geometría. Por ello, y por su especial importancia, se ha fabricado en fibra de vidrio, para poder plasmar modelos con las formas específicas requeridas. A continuación se puede apreciar la forma que adopta la campana de contracción y el sentido del flujo en la misma:

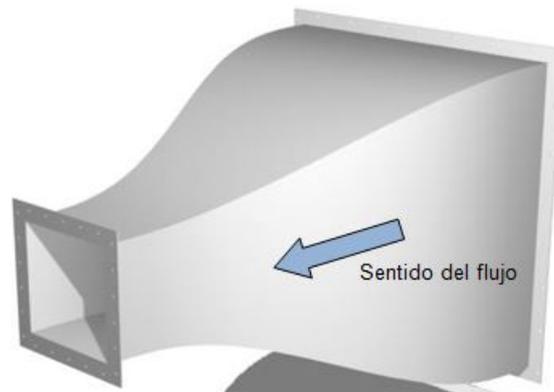


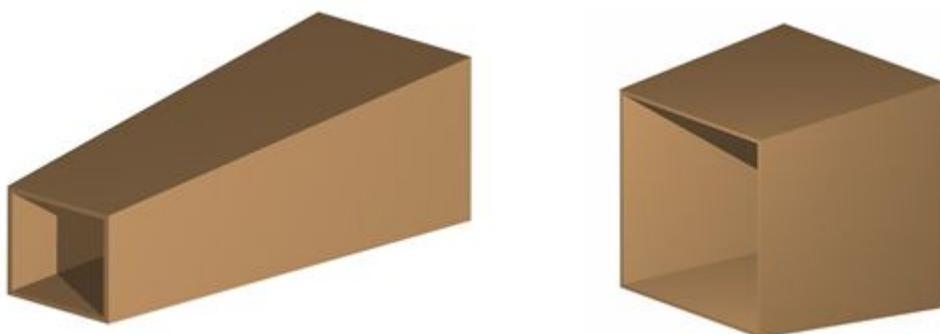
Figura 2.10: Campana de contracción del túnel de viento

Difusores

El túnel de viento cuenta con un total de 5 difusores que aumentan la geometría por detrás del la zona de medida hasta al alcanzar la sección transversal de entrada de la campana de contracción. La función de estos difusores no es otra que la de reducir la velocidad expandiendo el fluido y recuperando la presión estática.

Estas piezas, fabricadas en madera contrachapada de espesor $t = 24 \text{ mm}$, tienen un ángulo de apertura y, por tanto, los bordes delanteros y traseros son biselados con un ángulo determinado para cada difusor. Así, las aristas proyectadas hacia la salida de cada difusor conservan ese ángulo, ya que cualquier variación provocaría una alteración del comportamiento del fluido en el interior del propio túnel.

Los distintos difusores se encuentran repartidos a lo largo del túnel de viento, como se puede ver en la imagen al final de esta sección. Ello nos indica que, según donde estén colocados, han sido fabricados con diferentes ángulos de apertura y dimensiones. No obstante, dicho ángulo en ningún caso debe superar los 4 grados ya que el flujo se puede desprender de las paredes del difusor y provocar vorticidad que debe ser evitada ya que induce a un incremento en la turbulencia. Algunos de los difusores que encontramos en el túnel son los siguientes:



(a) Difusor salida zona de medida

(b) Difusor salida ventilador

Figura 2.11: Ejemplos de difusores del túnel de viento

Codos

Todos los codos están diseñados con las mismas pautas, formando los 4 vértices que dan lugar al túnel de viento cerrado. Así, están compuestos por 8 vanos directores de flujo equidistantes y distribuidos sobre la diagonal del codo. Cada uno de los vanos tiene un espesor de $t = 1,5 \text{ mm}$.

De entre esos álabes, 6 están fijados a una plancha de metal con forma rectangular y bordes redondeados, para que queden asegurados y poder introducirlos a la diagonal del codo. Estos vanos se alargan hasta una distancia de 13 cm para evitar el desprendimiento del flujo y un mal comportamiento de éste en el interior del túnel. Los 2 restantes, están acoplados a ambas esquinas de madera, a ras de los difusores y los codos, con el fin de evitar perturbaciones en el flujo.

El ensamblaje final entre la madera y las superficies metálicas dan como resultado cada uno de los codos del túnel de viento:

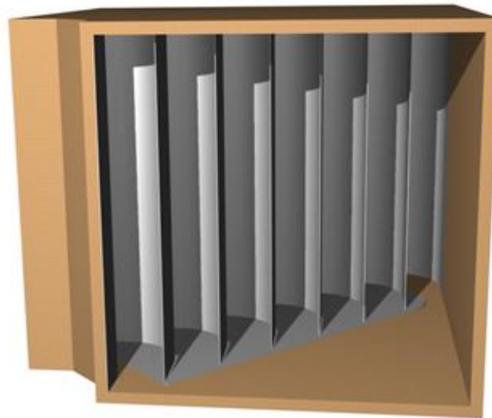


Figura 2.12: Acabado final de cada uno de los codos del túnel de viento

Ventilador

El ventilador empleado en este túnel de viento es un ventilador axial y en impulsión, con el fin de entregar un mayor caudal por encima de los centrífugos y tangenciales. Además, es capaz de generar un aumento de presión ideal para este tipo de túneles ya que no incrementa la presión en exceso en su interior. Asimismo, resulta idóneo puesto que tanto el montaje y el desmontaje como el mantenimiento resultan sencillos.

La composición del mismo permite que los cambios de sección sean solidarios a los dos difusores que rodean el conjunto que forma el ventilador. Está constituido por 9 palas y, como es lógico pensar, genera perturbaciones en el fluido en cuestión. Sin embargo, dichas perturbaciones se anulan mediante elementos laminadores y con la propia geometría de la campana de convergencia ubicada delante de la zona de medida.

Se trata de un modelo TGT-1250 con potencia de $P = 37 \text{ kW}$ pudiendo alcanzar las 3000 rpm, quedando ilustrado en la siguiente figura:

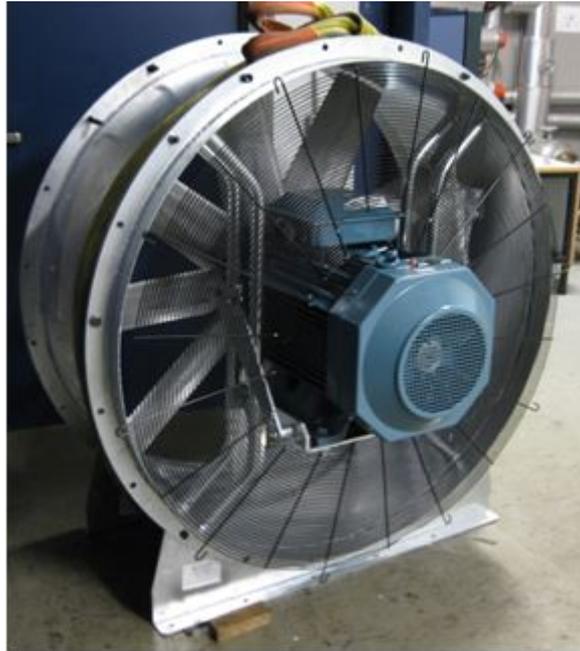


Figura 2.13: Ventilador del túnel de viento

Volviendo al cambio de sección, se trata de dos piezas idénticas situadas simétricamente respecto del ventilador, que se encargan de mantener la superficie cuadrada de ambos difusores. Así, los adaptadores junto con el carenado del ventilador de sección circular dan lugar al conjunto completo del ventilador:

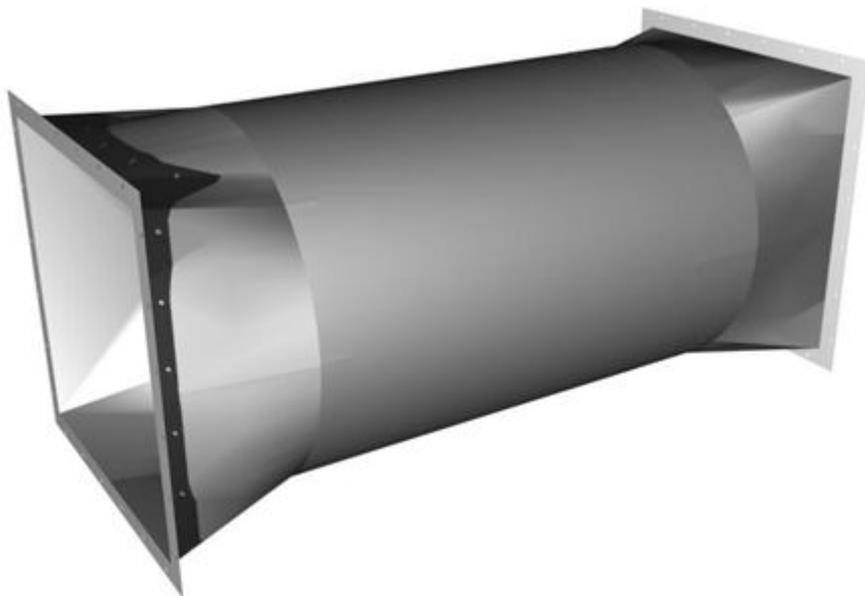


Figura 2.14: Conjunto completo del ventilador

Disposición

Una vez descritas las diferentes partes que componen el túnel de viento cerrado, se puede apreciar la organización de éstas en la siguiente figura:

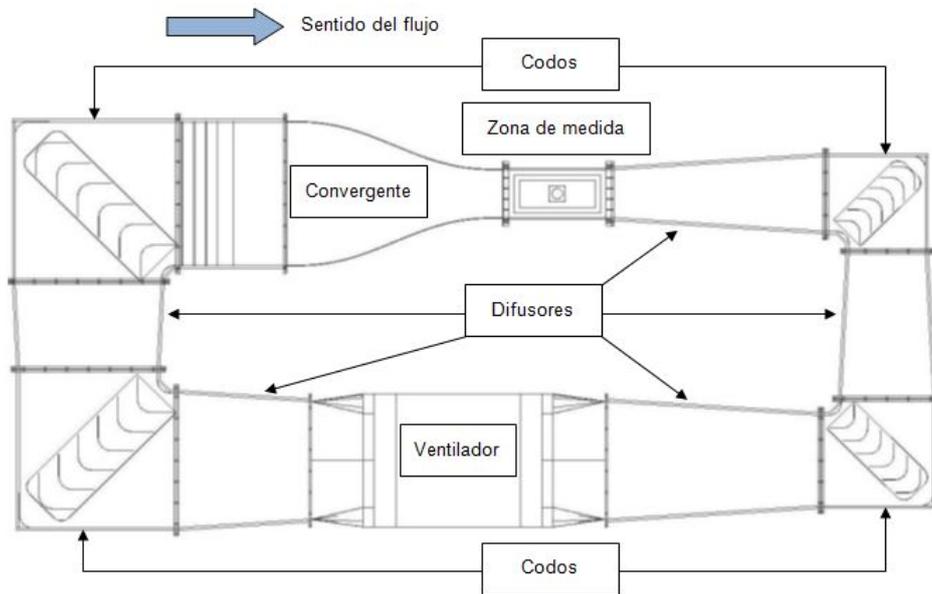


Figura 2.15: Disposición de las partes del túnel de viento cerrado

2.3.2. Instrumentación

El túnel de viento cuenta con una serie de instrumentación que permite, como es el caso, la realización de proyectos de investigación en aerodinámica y ramas derivadas. Así, nos centraremos en el tubo de pitot y en el control de potencia, ya que a pesar del hecho de que el túnel de viento cuenta con otro tipo de instrumentación, ésta ha sido la empleada para este estudio.

Tubo de Pitot

El tubo de pitot es de lectura digital y permite conocer la velocidad del aire a lo largo de la sección transversal de la zona de medida. Consta tanto de toma dinámica como estática, de modo que se obtiene la velocidad absoluta de la corriente, teniendo una máxima de 100 m/s .

Al emplear este túnel de viento, se tiene la posibilidad de obtener las condiciones en cualquier parte de la zona de medida imponiendo el tubo de pitot en la posición deseada, enfrentando el extremo del propio tubo en la dirección del flujo. Además, cuando se introduce un elemento que perturbe el flujo en el túnel de viento, se puede cuantificar la estela que deja tras de sí dicho elemento introduciendo detrás del mismo un rastrillo de tomas de tubos de pitot, el cual sirve para detectar la vorticidad originada por el elemento.

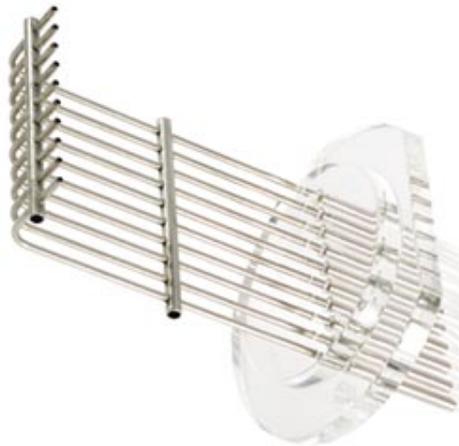


Figura 2.16: Rastrillo de tubos de pitot

Finalmente, destacar que la medida obtenida en el lector digital es el de la presión dinámica en hPa , que nos permitirá hallar la velocidad.

Control de potencia

Como se ha comentado, el túnel cuenta con un ventilador axial que se encarga de generar el flujo de aire a lo largo de éste. De esta manera, se necesita controlar la potencia de dicho flujo para saber en que condiciones trabajamos.

Así, la velocidad del aire se controla mediante el control de potencia situado sobre la zona de medida. Con este aparato se puede modificar la frecuencia de trabajo del motor eléctrico encargado de mover el eje del ventilador. Es de muy fácil manejo, ya que posee una pantalla digital donde se puede apreciar el valor de dicha frecuencia, variada mediante una rueda giratoria. Dicha variación de frecuencia se produce de 0 a 50 Hz .

Capítulo 3

Método experimental

En este capítulo se describe de forma exhaustiva todo aquello relacionado con el estudio experimental llevado a cabo con el fin de investigar sobre un fenómeno tan importante como es el flameo.

De esta manera, se presentan las características de los materiales que han sido empleados para la construcción de la estructura y su integración al túnel de viento, así como para hacer posible la determinación de las condiciones de medida. Destacar el hecho de que se han utilizado materiales simples, ya que no se buscaba un estudio complejo con un alto impacto económico en lo que al montaje se refiere, pero que se han empleado todos los necesarios para poder realizar un estudio óptimo acerca del flameo. Asimismo, se muestra la propia estructura montada mediante imágenes para obtener un entendimiento visual del caso, junto con la configuración que ha sido probada.

Por otro lado, también se exponen los resultados obtenidos para el caso general de estudio, explicando el movimiento descrito por la estructura, el cual por otro lado no deja de ser un poco ambiguo. Además del movimiento que realiza, y para llegar al objetivo final de este estudio, se ofrecen las condiciones en las que la estructura ha flameado.

Además, aprovechando el estudio realizado por mi compañero de proyecto Jordi García Martínez sobre el flameo de una estructura compuesta por una placa plana en túnel de viento, se ha hecho una comparativa entre ambos casos con la misma configuración. Así se ha podido determinar el papel y los efectos que ejerce esa segunda placa que conforma una estructura articulada y facilita un movimiento más fluido de la misma. Esto ha sido posible ya que ambos estudios se han hecho de forma simultánea, cada uno con sus estructuras tipo, pero empleando los mismos materiales y trabajando en las mismas condiciones. De hecho se ha llegado a coincidir en muchas ocasiones en la ejecución de los diferentes ensayos en el túnel de viento, lo cual pone de manifiesto el hecho de que la comparación de ambos casos sea óptima ya que las condiciones de medida eran exactamente las mismas.

Cabe destacar que la presentación de este capítulo sienta todas las bases necesarias para el posterior desarrollo del estudio paramétrico, ya que ofrece todas las condiciones y características empleadas.

3.1. Montaje de la estructura y material empleado

Como se ha comentado, en esta sección se presenta como se ha realizado el montaje de la estructura a tratar y el material que ha sido empleado para ello, así como la caracterización de cada elemento que ha permitido proceder a este estudio. Así, de forma inicial se muestra la estructura completamente integrada en el túnel de viento para ayudar a la comprensión visual del caso y una posterior descripción de cada una de las partes que la componen:

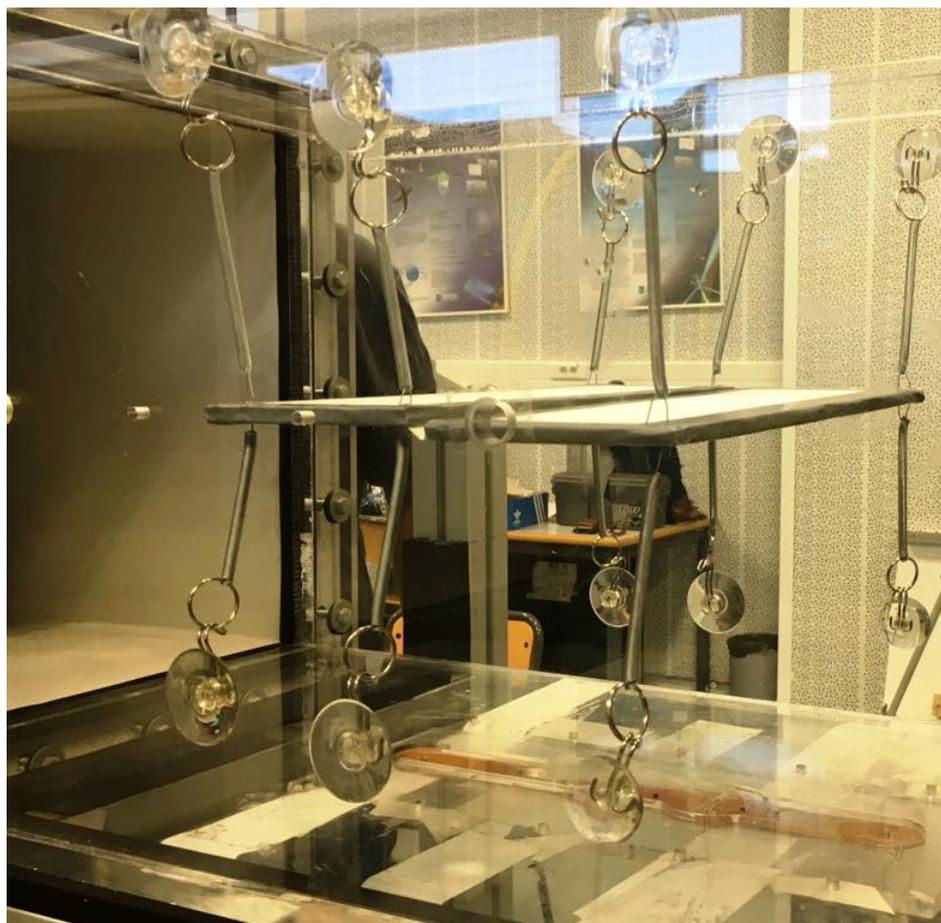


Figura 3.1: Estructura de placas articuladas en túnel de viento

Una vez visto el montaje de la estructura, primero se hará una descripción de los materiales empleados y luego de la disposición en el túnel de viento.

Material empleado

El objetivo de este proyecto era el de estudiar el flameo en una estructura de placas articuladas. Por ello, se han empleado diferentes materiales que han permitido de forma ingeniosa obtener un diseño sencillo, pero a la vez óptimo para la investigación de este fenómeno.

La parte principal de la estructura está compuesta por *espuma deprom*. Concretamente se han usado placas de esta espuma de espesor, $t = 4 \text{ mm}$ que han hecho el papel de la superficie sustentadora. A causa del reducido espesor de estas placas y a la ligereza que ello supone,

realmente se han utilizado tres de esas placas unidas para conformar una estructura más sólida y consistente dando lugar a una de las dos placas de espesor $t = 12 \text{ mm}$ que conformarían la estructura. El ala es el elemento que sirve de punto de partida para el análisis aeroelástico por ser el elemento que recibe la mayor componente de la sustentación y además por ser el más deformable. Además, es una superficie cuyo espesor es mucho más pequeño que la cuerda, por lo que los puntos que la conforman se pueden tomar como parte de su eje horizontal. Debido a ello es por lo que se han podido tomar placas planas para formar parte de la estructura, siendo éstas superficies con menores prestaciones aerodinámicas, pero igual de válidas para simular el comportamiento alar.

El principal motivo de empleo de este tipo de material para componer el sistema reside en el conocimiento previo de su buen comportamiento en las condiciones impuestas en el túnel de viento. Ello es sabido por el trabajo realizado durante el año anterior por la alumna María del Carmen García Aguilar, [8], que estudió este mismo fenómeno y también empleó este material, llegando a obtener resultados óptimos. Así, bajo las condiciones impuestas en el propio túnel, las cuales debían afectar de forma brusca a la estructura si se pretendía llegar a condiciones de flameo, se pudo comprobar la efectividad de esta espuma para el estudio de dicho fenómeno. Otro de los motivos por los que se escogió este material es su gran relación utilidad-precio, ya que, como se ha dicho, soportó las condiciones del túnel de viento y permitió el desarrollo del proyecto, teniendo un precio bastante reducido.

Otro material a mencionar un poco menos significativo, pero igual de necesario en el montaje, es la **cinta americana**. Ésta ha sido utilizada tanto para unir las tres placas de espuma que conformaban una de las placas generales de $t = 12 \text{ mm}$, como para permitir el acoplamiento entre las dos placas y dar lugar a la superficie sustentadora. Así, se han cubierto todos los extremos y las esquinas de las placas para dotar de mayor uniformidad y firmeza al sistema y la separación entre ambas generada con la cinta ha permitido un mayor juego al movimiento articulado de la estructura.

Por otro lado, es sabido que en todas las ramas de la ingeniería, para poder estudiar y comprender mejor el comportamiento de los sistemas físicos, se realizan modelos que representan de forma ideal su comportamiento y que permiten expresarlo matemáticamente. La aeroelasticidad no iba a ser diferente y, en ese sentido, se han plasmado diferentes modelos para poder estudiar la interacción de las diferentes fuerzas del triángulo de Collar. El modelo denominado *perfil característico* o *perfil equivalente* se basa en el trabajo con una de las secciones de ala, de forma que se puedan extrapolar los resultados obtenidos como válidos para toda el ala. Esta simplificación permite reducir el comportamiento del ala al de un perfil cuya cinemática es la de un sólido rígido que se desplaza en vertical y girando. Así, el modelo estructural del perfil equivalente se reduce en la consideración de muelles que permitan esos movimientos, [1].

En nuestro caso, como tenemos una estructura articulada se generarán más movimientos que los citados en el párrafo anterior, pero la modelización se lleva a cabo de la misma manera. Así, como se puede apreciar en la imagen 3.1, se han empleado doce **muelles** de diámetro $\varnothing = 5 \text{ mm}$ repartidos por toda la estructura, cuatro en el borde de ataque, cuatro en el de fuga y cuatro cerca de la unión de ambas placas, con el fin de dotar de esa elasticidad necesaria a todo el sistema.

De esta forma, para tener un informe más detallado sobre las características de los elementos que componen la estructura, se ha procedido a la obtención de la constante de rigidez de estos muelles. Esta caracterización se ha llevado a cabo también de forma experimental debido a la falta de información aportada por el fabricante de dichos muelles. Destacar que el estudio experimental de los muelles se ha realizado sobre varios de ellos, ya que a pesar de que se ha trabajado con el mismo tipo de muelles, las propiedades de éstos pueden llegar a no ser exactamente las mismas pues se trata de parámetros muy sensibles. Sin embargo, aunque obtener las mismas longitudes para cada muelle resultará difícil, se ha estimado una longitud media de 7 cm y a continuación se muestra el resultado más representativo que servirá como referencia para estos muelles.

Cuando se habla de caracterización de muelles es inevitable pensar en la conocida *Ley de Hooke*, la cual puede definirse según:

”La ley de elasticidad de Hooke, originalmente formulada para casos de estiramiento longitudinal, establece que el alargamiento unitario que experimenta un material elástico es directamente proporcional a la fuerza aplicada sobre el mismo”

Matemáticamente, la forma más común de representarla es mediante la ecuación de un muelle o resorte, donde se relaciona la fuerza ejercida por el resorte con la elongación provocada por la fuerza externa aplicada al extremo del mismo, que en este caso será el peso de las diferentes masas utilizadas en el laboratorio.

$$F = k(x - x_0) \quad (3.1)$$

donde F es el módulo de la fuerza que se aplica sobre el muelle (el peso de las masas), k es la constante elástica del muelle que relaciona fuerza y alargamiento, x_0 es la longitud del muelle sin aplicar la fuerza y x es la longitud del muelle con la fuerza aplicada.

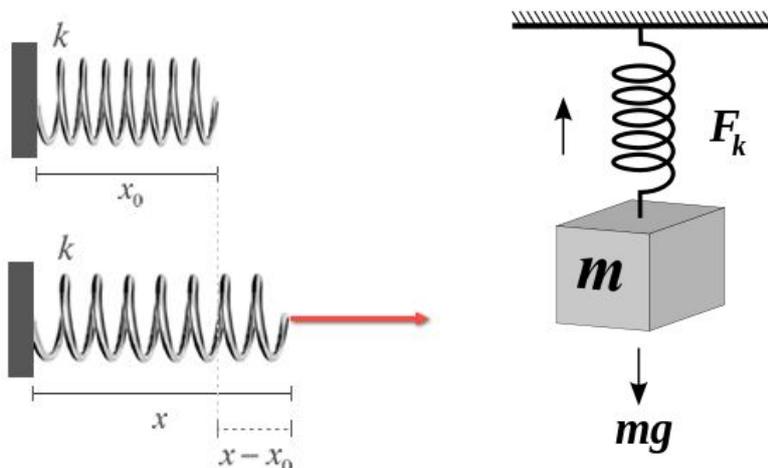


Figura 3.2: Representación de la Ley de Hooke

Como podemos ver en la imagen 3.2, una buena forma de caracterizar muelles es colgando masas en sus extremos para poder ver la elongación de estos. Así, se han trabajado con diez masas diferentes para poder hacer una estimación lineal del comportamiento del muelle.

El procedimiento siempre comienza con la medida del muelle sin aplicar ninguna fuerza en su extremo. Seguidamente, probando cada una de las masas, se medirá la nueva longitud adquirida por el muelle para poder determinar el alargamiento del mismo.

Si nos fijamos en la ecuación 3.1, existe una relación lineal entre la fuerza que se ejerce y la elongación que experimenta el muelle, interpretada por medio de la constante elástica, k , que queremos determinar. Por ello, tras repetir el proceso descrito con las diez masas, se ha representado la evolución del peso ejercido por cada masa con la elongación obtenida en cada caso. De esta manera, se ha obtenido la ecuación de la recta que gobierna estos ensayos, en la cual la pendiente nos indica esa constante elástica.

El tratamiento de los datos obtenidos experimentalmente se ha realizado mediante una hoja de cálculo Excel, llegando a obtener la siguiente gráfica:

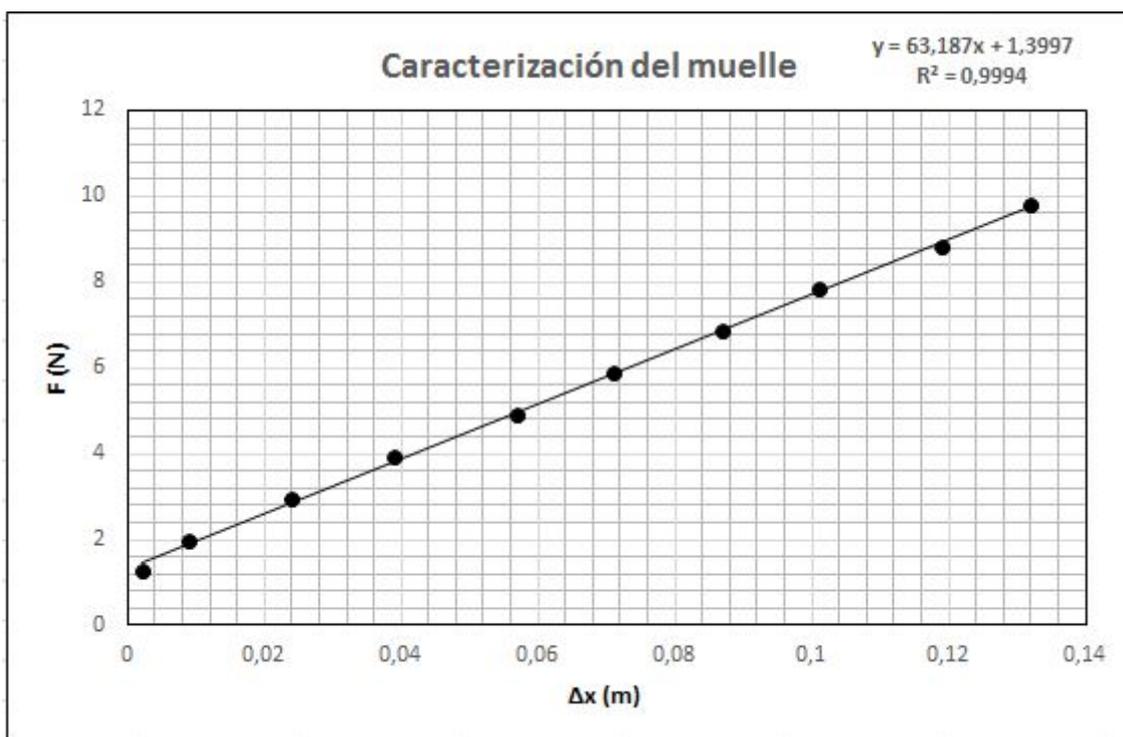


Figura 3.3: Caracterización experimental del muelle

Como se puede apreciar en el gráfico, la correlación obtenida es de 0,9994 por lo que la relación lineal entre ambas variables es óptima. Asimismo, la evolución de la fuerza con la elongación queda representada según la ecuación $F = 63,187\Delta x + 1,3997(N)$. La ordenada en el origen 1,3997 se puede considerar como error en la toma de medidas, ya que resulta impensable que se produzca una fuerza en el muelle cuando la elongación en este sea de 0 m. Así, como se ha comentado, la pendiente de esta recta nos indica la constante de rigidez de los muelles, siendo ésta:

k (N/m)	63,187
---------	---------------

Tabla 3.1: Constante de rigidez de los muelles

Retomando de nuevo el listado de materiales utilizados, toca hablar de como se ha establecido la unión entre los muelles y el túnel de viento. En primer lugar, se han empleado doce **ventosas** correspondiéndose con los doce muelles que permiten la sujeción de éstos a las paredes laterales de la zona de medida del propio túnel.

En segundo lugar y, por consiguiente, se han utilizado doce **anillas** que permiten reforzar la unión entre las ventosas y los muelles, ya que esta parte de la estructura era muy sensible a las condiciones impuestas en el túnel de viento, debido también a la ligereza de los muelles. Por ello, las anillas sirvieron para dotar de estabilidad al sistema sin provocar alteraciones en los resultados hallados.

Por otro lado, también se ha hecho uso de una **arandela metálica** que cumplía dos funciones esenciales en este estudio. Una de ellas era la de dotar de más peso a la estructura, ya que, en un primer momento se hicieron pruebas contando tan sólo con las placas y debido a la ligereza de la estructura había dificultades para estudiar las condiciones de flameo. Así pues, una vez adherida la arandela con cinta americana y con la adición de peso que ello supone, los ensayos se pudieron desarrollar de una forma más óptima. La segunda función que cumplía era la de poder desplazar el centro de gravedad de la estructura a lo largo de la cuerda, lo cual benefició la aparición del flameo conforme se retrasaba. Esta arandela tenía como radios exterior e interior $r_e = 15 \text{ mm}$ y $r_i = 5 \text{ mm}$.

Una vez mencionados todos aquellos materiales que han sido utilizados para construir la estructura e integrarla en el túnel de viento, cabe destacar dos aparatos más, aparte de la instrumentación correspondiente al túnel de viento ya descrita anteriormente.

El primero se corresponde con una **cámara FastCam APX** de la marca Photron. Se trata de una cámara de alta velocidad con la que se ha grabado el movimiento oscilatorio de la estructura. Esta cámara es capaz de grabar 6000 fotogramas por segundo, y ha resultado bastante útil para poder determinar la amplitud de dicho movimiento y la frecuencia oscilatoria. Esto es debido a la alta velocidad a la que se produce el proceso, el cual resulta imperceptible en toda su plenitud a simple vista, ya que se producen un gran número de vibraciones en muy poco tiempo.

Se hicieron varias pruebas con esta capacidad de grabación, la cual aportaba una calidad de imagen 512 x 512. No obstante, a causa de la disposición horizontal de nuestra estructura, nos interesaba un tipo de imagen más apaisada. De esta forma, se redujo la captación de imágenes a 4000 por segundo, consiguiendo una calidad de imagen de 1024 x 512. La cámara se puede apreciar en la siguiente imagen:



Figura 3.4: Cámara FastCam APX de la marca Photron

Así, se colocó en el lateral de la zona de medida, a la vez que se apagaron las luces generales del laboratorio y se emplearon dos adicionales, junto con una cuadrícula negra de fondo para obtener una imagen más nítida del proceso.

El segundo de los aparatos era una máquina de humo, que contaba con un tubo de diámetro reducido para poder introducirlo por una de las paredes laterales de la zona de medida. Esta máquina simplemente tenía una función estética, ya que junto con la utilización de la cámara de alta velocidad, permitía apreciar el comportamiento del flujo de aire a lo largo de la estructura, lo cual no deja de ser interesante pues se pudieron observar zonas de recirculación de flujo gracias a esta máquina.

Disposición en el túnel de viento

Ya se han descrito los materiales que se han utilizado para llevar a cabo el montaje y se han especificado cada una de sus funciones. Ahora bien, se ha de presentar cual ha sido la configuración utilizada para la toma de resultados, independientemente de la posterior variación de algunos parámetros.

Para comenzar, hay que mencionar que la estructura ha sido tratada con una posición inicial de ángulo de ataque nulo, para que esta variable no influyera de primeras en el proceso. Ello no quiere decir que a medida que se aumentaba la velocidad del flujo en el túnel de viento no se fuera induciendo un ángulo de ataque, α .

Seguidamente y antes de presentar los datos inherentes a la configuración establecida, es necesario aclarar algunos puntos de interés, como la masa de la estructura o la determinación del centro de gravedad.

En ese sentido, los datos referentes a la masa de los componentes de la estructura, siendo la masa la de una de las dos placas de $c = 12 \text{ cm}$, se han obtenido mediante una balanza digital

de uno de los laboratorios del Centro de Máquinas y Motores Térmicos de la UPV, realizando varias veces la medida de ellas para su comprobación. Son los siguientes:

m_{placa} (kg)	0,02575
$m_{arandela}$ (kg)	0,01246

Tabla 3.2: Masas de la estructura

Por otro lado, hay que tener en cuenta que según el movimiento descrito por la estructura se ha visto que la placa delantera es la que ejercía una mayor influencia en este. Por ello, a continuación se detalla como se ha obtenido el centro de gravedad de la primera de las placas, la cual contaba con la arandela adherida:

$$X_{cdg} = \frac{m_{placa} \cdot x_{placa} + m_{arandela} \cdot x_{arandela}}{m_{total}} \quad (3.2)$$

donde x_{placa} y $x_{arandela}$ se corresponden con la posición de los centros de gravedad de la placa y la arandela, situada esta última al final de la placa, tomados desde el borde de ataque de la estructura.

Así, para contabilizar la influencia, en cuanto al centro de gravedad se refiere, de la placa que hace el papel de flap, tan solo habría que añadir la masa de ésta (que es la misma que la de la placa delantera) y añadir la posición de su centro de gravedad contando con el centímetro de juego que se deja entre ambas placas.

Lo lógico sería pensar que, como el centro de gravedad de la estructura global sin incluir la arandela está en el medio justo, cuando se habla de “retrasarlo” se colocaría la arandela en la placa que hace de flap. Sin embargo, tiene que quedar claro que lo que se hace es retrasarlo con respecto a la placa delantera, ya que, como se ha comentado, es la que ejerce una mayor influencia en el movimiento de la estructura, ya que es la que recibe el flujo de forma directa. Esta explicación sirve para el posterior análisis paramétrico y será analizada más a fondo en dicho capítulo.

Así, seguidamente se muestra la configuración referente a la placa delantera con la arandela y a la estructura global para que no haya dudas y también sirva de introducción para la comparación que se ha hecho con el caso de una sola placa, caso estudiado por otro alumno. Para una sola placa con la arandela al final de ésta se tiene:

Placa plana	
c (m)	0,120
b (m)	0,395
AR	3,292
m_{total} (kg)	0,038
X_{cdg} (m)	0,075

Tabla 3.3: Parámetros característicos de placa plana

Contabilizando la placa que hace de flap y presentando la estructura global:

Estructura completa	
c (m)	0,250
b (m)	0,395
AR	1,580
m_{total} (kg)	0,063
X_{cdg} (m)	0,121

Tabla 3.4: Parámetros característicos de placa plana

A continuación se puede ver otra imagen de la disposición del sistema en el túnel de viento:

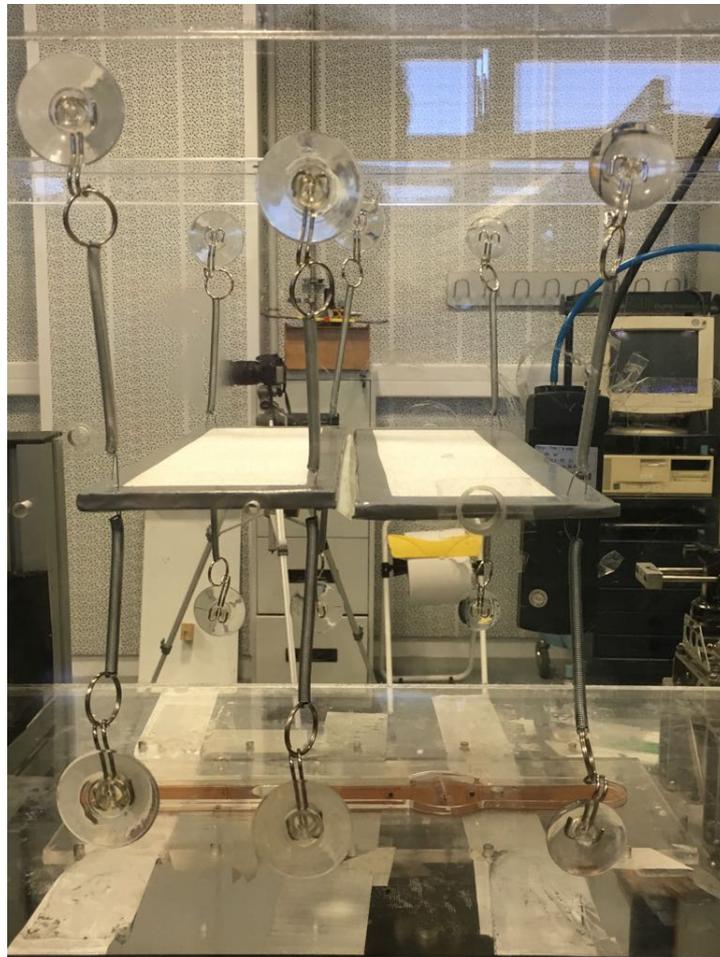


Figura 3.5: Disposición de la estructura articulada

De esta manera, una vez presentado el valor de las diferentes variables geométricas y másicas que gobiernan el problema, se está en disposición de presentar en la sección siguiente los resultados obtenidos experimentalmente.

3.2. Obtención de resultados

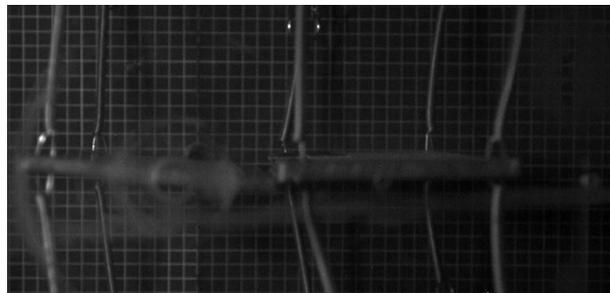
En esta sección se describirán los procedimientos empleados para la obtención de las condiciones que caracterizan el punto de flameo de la estructura, así como el movimiento descrito por la misma.

Para la captación del **movimiento**, como se ha comentado anteriormente, se ha hecho uso de la cámara FastCam APX cuyas propiedades han permitido obtener a cámara lenta la secuencia oscilatoria para una mayor apreciación del proceso.

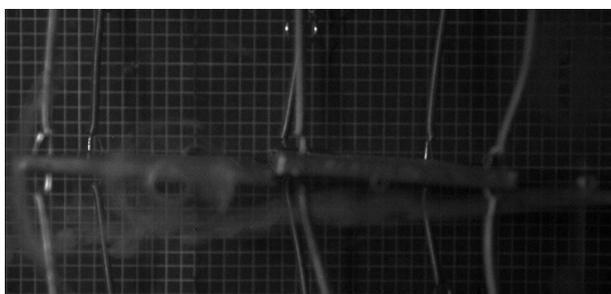
A continuación se puede ver mediante las cuatro imágenes siguientes como se ha desarrollado el movimiento de la estructura:



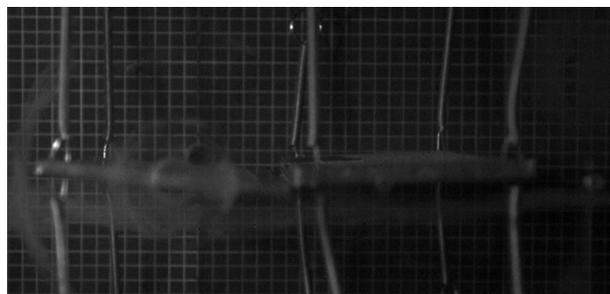
(a) Movimiento 1



(b) Movimiento 2



(c) Movimiento 3



(d) Movimiento 4

Figura 3.6: Secuencia de movimientos de la estructura articulada en condiciones de flameo

Destacar que los vídeos grabados por esta cámara engloban aproximadamente un segundo del movimiento percibiendo las condiciones de flameo. La secuencia descrita en la imagen 3.6 comprende tan solo uno de los ciclos que se repite durante todo el proceso.

Seguidamente, se procede al análisis de cada uno de los movimientos descritos por el sistema, donde hay varios puntos importantes a resaltar:

Para empezar, hay que mencionar que se han llegado a las condiciones de flameo aumentando progresivamente la frecuencia del motor que mueve el eje del ventilador encargado de provocar ese flujo de aire. Así, conforme se incrementaba la velocidad de la corriente incidente, se empezó a observar como la estructura comenzaba a vibrar de forma cada vez más acentuada,

aproximándose a las condiciones de flameo.

Además de ese movimiento vibratorio, se pudo apreciar como la placa delantera, la que recibía de forma directa la corriente incidente, iba incrementando su ángulo de ataque, α . Ello es lo que dio pie al **Movimiento 1** de la figura 3.6, alcanzando un ángulo de ataque máximo para esta placa que superaba el de entrada en pérdida. En todos los ensayos realizados con este tipo de configuración se observó ese comportamiento, ese incremento progresivo de ángulo de ataque en la placa delantera hasta aproximarse al de entrada en pérdida para dicha placa y comenzar el flameo, todo ello unido al aumento de velocidad que se imponía en el túnel.

En ese mismo movimiento, la placa trasera (la que hace la función de flap) adquiriría una condición de ángulo de ataque negativo debido a la sacudida generada por la primera placa y al juego permitido entre ellas. Además, resaltar que dicha placa no alcanzaba el mismo movimiento que la primera, ya que sus condiciones geométricas iguales a la delantera le otorgaban cierta independencia en lo que al movimiento se refiere. En ese sentido, el incremento brusco de sustentación que experimentaba la placa delantera era suavizado por la trasera que dotaba de cierta estabilidad al sistema.

Asimismo, fijándose en la estela de humo que recorre la estructura, se puede ver el desprendimiento del flujo que origina la entrada en pérdida como consecuencia de la gran diferencia de presiones que se ha generado.

Una vez entraba en pérdida la primera placa, se pudo apreciar uno de los grados de libertad inesperados en el movimiento de la estructura: el desplazamiento horizontal a lo largo de su eje x . Lo normal es que una vez entrase en pérdida dicha placa, la estructura pasase por su posición de equilibrio y adoptara una configuración de ángulo de ataque negativo, como se podrá ver en la posterior comparación con el caso de una sola placa. Ello no deja de ser cierto pero, sin embargo, siguiendo con el ciclo del movimiento, se pudo ver como adoptaba de nuevo la posición de equilibrio pero a la vez se producía un movimiento horizontal en la dirección en la que incidía la corriente, es decir, la estructura retrasaba su posición con respecto a dicho eje x . Esto se refleja en el **Movimiento 2** de la figura 3.6, donde se puede percibir esa posición de equilibrio inicial pero retrasada con respecto al comienzo del movimiento con los muelles formando un cierto ángulo con el plano vertical.

Ese movimiento horizontal es fruto del desplazamiento que experimenta la placa trasera mientras la delantera está incrementando su ángulo de ataque. Cuando ésta entra en pérdida y se continua con el ciclo del movimiento, es arrastrada por la trasera originando ese nuevo grado de libertad que retrasa la estructura en el eje x .

Siguiendo con la secuencia descrita y como se ha comentado, la estructura adopta una posición con un ligero ángulo de ataque negativo. La entrada en pérdida de la primera placa supone su “*precipitación*” hacia abajo. No obstante, debido a la estabilidad aportada por la placa trasera y también a las propiedades elásticas de los muelles, ese ángulo negativo resultó ser bastante reducido. Además, si ponemos atención en la estela de humo bajo la estructura, se pueden apreciar zonas de recirculación donde el flujo presenta un comportamiento caótico fruto de la perturbación originada por la estructura en configuración de ángulo de ataque negativo.

Ello queda reflejado en el **Movimiento 3** de la figura 3.6.

Finalmente, el último de los desplazamientos descritos se contempla en el **Movimiento 4**, donde la estructura recupera su posición de equilibrio previo paso al comienzo de un nuevo ciclo vibratorio.

Así pues, una vez definida la secuencia de carácter oscilatoria, también hay que destacar que todo el proceso va acompañado del desplazamiento vertical de la estructura. De este modo, prestando atención a los cuatro grados de libertad principalmente identificados, podría decirse que el movimiento adopta una trayectoria un tanto “*elíptica*” más acentuada hacia el extradós de dicha estructura. Los cuatro grados de libertad son: el desplazamiento vertical, $h(t)$, el giro de la placa delantera, $\alpha(t)$, el giro de la placa trasera, $\beta(t)$, y el desplazamiento horizontal, $l(t)$.

A continuación se procede a la presentación de los resultados asociados al **punto de flameo de la estructura**. En ese sentido y dado el comportamiento oscilatorio del sistema, aparte de la velocidad de flameo se han determinado tanto la frecuencia como el periodo de oscilación. Evidentemente esto se ha podido realizar gracias al vídeo en cámara lenta mediante la perfecta percepción visual del proceso.

Por un lado, se calcula la velocidad de flameo por medio de la presión dinámica leída directamente del lector digital del tubo de pitot del túnel de viento. Así, mediante la expresión de la presión dinámica obtenemos dicha velocidad:

$$V_f = \sqrt{\frac{2 p_f}{\rho_\infty}} \quad (3.3)$$

donde V_f hace referencia a la velocidad de flameo, p_f a la presión obtenida del lector digital en condiciones de flameo y ρ_∞ a la densidad del aire con valor de $1,225 \text{ kg/m}^3$.

De este modo, como la presión de flameo es de $p_f = 1,13 \text{ hPa}$, la velocidad de flameo correspondiente:

$$V_f = 13,583 \text{ (m/s)}$$

Por otro, para hallar tanto el periodo como la frecuencia oscilatoria se ha hecho uso de las grabaciones de la FastCam APX. Para ello, se colocó una cuadrícula en el lateral de la zona de medida del túnel de viento, para poder contabilizar de una forma más sencilla estos dos parámetros.

Así, para el periodo simplemente se ha de prestar atención al tiempo que tarda la estructura en realizar la secuencia descrita en la figura 3.6. Esto quiere decir ver cuanto tiempo tarda el sistema en partir de su posición de equilibrio y volver a ella completando un ciclo. La contabilización de tiempos según los vídeos:

$$T_f = 0,8195 - 0,7280 = 0,0915 \text{ (s)}$$

Para la frecuencia, se ha procedido de dos maneras. Una de ellas y la más fácil de recurrir es a través de la inversa del periodo de oscilación $f_f = \frac{1}{T_f}$:

$$f_f = 10,93 \text{ (Hz)}$$

La otra forma tiene otra vez relación con el vídeo. Es sabido que los hercios se corresponden con el número de ciclos por segundo. Así, tan solo hay que contar cuantas veces se repite dicho ciclo durante un segundo del vídeo. En este caso se ha obtenido 11 ciclos por segundo, por lo que se puede tomar como válida la frecuencia de 10,93 (Hz). Esto se hace para contrastar todas las opciones posibles de determinación.

En resumen, las condiciones del punto de flameo de la estructura son las siguientes:

Punto de flameo	
V_f (m/s)	13,58
T_f (s)	0,09
f_f (Hz)	10,93

Tabla 3.5: Punto de flameo de estructura de placas articuladas de $c = 12$ cm

En la siguiente sección se ha establecido una comparación con el caso de una sola placa para ver la influencia de la segunda placa que permite la articulación del movimiento.

3.3. Comparación con el caso de placa plana simple

Como se ha comentado anteriormente, este estudio y el de mi compañero Jordi García Martínez se han ido desarrollando de forma conjunta y tienen un alto grado de relación. Ambos buscan indagar en el ya nombrado fenómeno del flameo en estructuras similares. Lo primero de todo es resaltar la doble finalidad de estos dos estudios analizados de forma conjunta.

Uno de ellos es el de ver el comportamiento de ciertas estructuras en condiciones de flameo, poder visualizar de forma física el proceso e intentar controlar las condiciones que dan pie a ello, mediante la investigación en el laboratorio.

El segundo, y ya más entrando en el caso de placas articuladas, tiene que ver con la influencia de tener una estructura más simple o más compleja. Y es que en el caso de placa plana, el comportamiento ante el flameo era más predecible debido a toda la documentación que se tiene y a los modelos estándar que se han implantado a lo largo de los años para el estudio de fenómenos aeroelásticos, [1]

De esta manera, primero se comparará la estructura compuesta por dos placas planas de $c = 12$ cm con la de una sola placa de la misma cuerda y luego la formada por una placa principal de $c = 18$ cm y otra que haga de flap de $c = 9$ cm con otra con cuerda $c = 18$ cm.

3.3.1. Estructura articulada y placa plana de $c = 12 \text{ cm}$

Primero presentaremos la configuración adoptada por la placa plana, así como su secuencia de movimientos en el túnel de viento aerodinámico, para que sirva de precedente a la comparativa. Así, la disposición de la placa plana en el túnel de viento es la siguiente:



Figura 3.7: Placa plana de $c = 12 \text{ cm}$ en el túnel de viento

Como se puede apreciar, se trata de un montaje similar al de la estructura articulada, con la única variación de esa segunda placa añadida al borde de fuga de ésta.

Así, en esta placa se ha colocado la arandela que permite retrasar el centro de gravedad al final de la placa obteniéndose la configuración mostrada en la tabla 3.3. Evidentemente, para que la comparación con la estructura articulada sea viable, se ha respetado la posición de la arandela en la placa delantera de esta última y se ha añadido otra placa de $c = 12 \text{ cm}$ adoptando la configuración expuesta en la tabla 3.4.

Una vez descritas las configuraciones de ambos sistemas a comparar, se procede a la breve explicación sobre el movimiento de la placa plana:

Como es de esperar, el movimiento del panel se ajusta a los dos grados de libertad que se observan cuando un ala experimenta el proceso de flameo presentando componentes de flexión y de torsión. Además, destacar que el propio montaje es el que permite que la estructura experimente estos dos movimientos. A continuación, mediante las imágenes se puede apreciar la secuencia de movimientos para una placa plana:

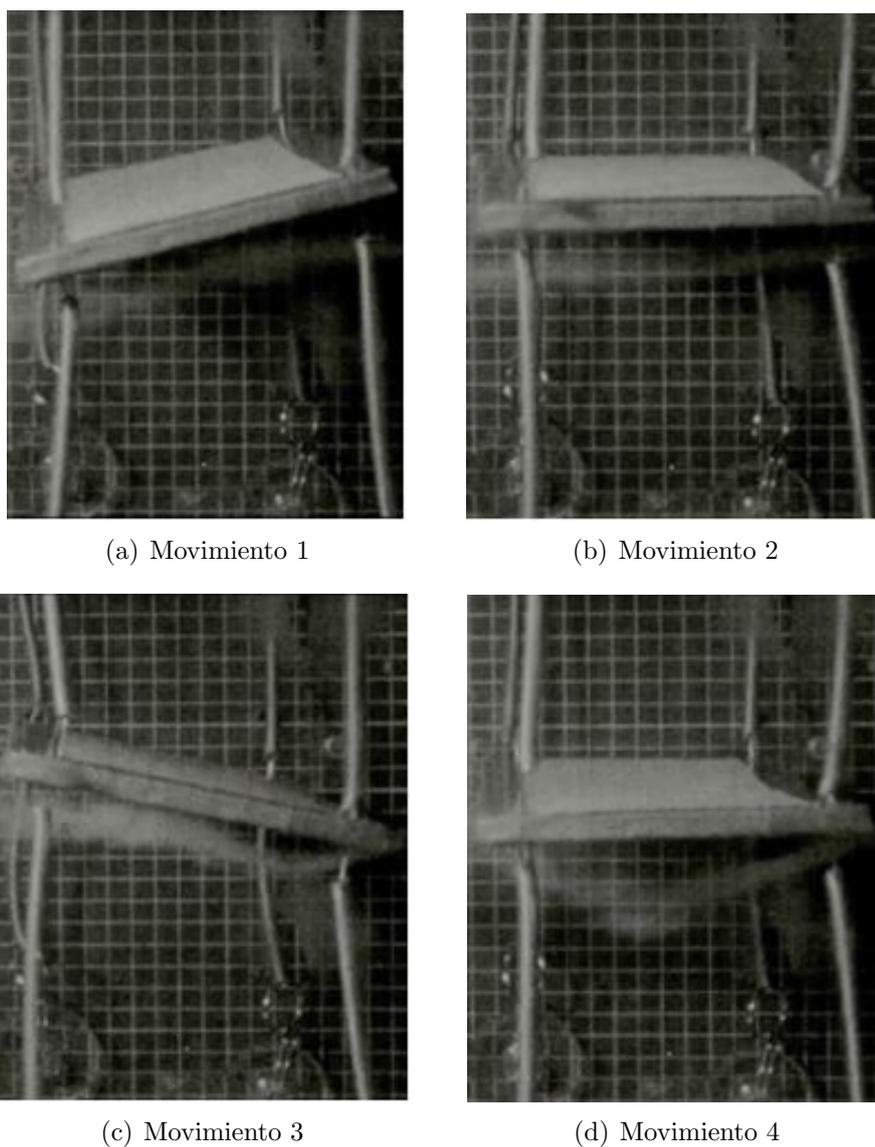


Figura 3.8: Secuencia de movimientos de la placa plana en condiciones de flameo

Al igual que ocurría con la estructura articulada, el movimiento descrito por la placa plana es de carácter oscilatorio, repitiéndose el ciclo mostrado en la figura 3.8 a lo largo del tiempo. A la luz de las imágenes, parece que dicho ciclo es similar en ambos casos.

Siguiendo de nuevo la figura 3.8, el aumento progresivo de velocidad implica un aumento progresivo del ángulo de ataque, α . Ello se corresponde con el **Movimiento 1**, donde la placa terminaba por superar el ángulo de ataque crítico y entraba en pérdida. Hasta ahí y prestando atención a la figura 3.6, el movimiento de ambas estructuras era similar, al menos para la placa delantera en el caso de la estructura articulada.

La diferencia la comenzaremos a identificar en el **Movimiento 2**. Una vez superado ese ángulo de ataque crítico, la placa entra en pérdida y se precipita hasta adoptar un ángulo de ataque negativo. Previo a ello, la placa pasa por su posición de equilibrio de ángulo de ataque nulo

que se corresponde con este movimiento. Ahora bien, para las dos placas articuladas ocurría lo mismo a la vez que se producía un movimiento horizontal en la dirección de incidencia del flujo de aire, lo cual suponía un grado de libertad inesperado que en este caso no tenemos. Para el caso de una sola placa, ésta simplemente pasa por su posición de equilibrio, ya que no cuenta con una segunda placa que reciba flujo de forma directa y provoque dicho desplazamiento horizontal.

Siguiendo con el **Movimiento 3**, la placa plana adopta una configuración de ángulo de ataque negativo como consecuencia de la entrada en pérdida. Para este caso, dicho ángulo negativo es bastante más acentuado que para el de la estructura articulada, puesto que para la segunda, la placa trasera dotaba de estabilidad al sistema ya que no entraba en pérdida y generaba un aumento global de la sustentación permitiendo mantenerse cerca de la posición de equilibrio. Por otro lado y como es lógico, para el caso de placa plana el flujo en el intradós presenta un comportamiento más caótico debido a ese elevado ángulo de ataque negativo llegando a desprenderse en mayor medida como se puede apreciar gracias a la estela de humo.

Finalmente, el ciclo termina en ambos casos en la posición de equilibrio de ambas estructuras en el **Movimiento 4**. Además, el proceso va acompañado de ese desplazamiento vertical que caracteriza el grado de libertad $h(t)$.

En resumen, para la placa plana visualizamos dos grados de libertad principales ($h(t)$ y $\alpha(t)$), mientras que para la estructura articulada cuatro ($h(t)$, $\alpha(t)$, $\beta(t)$ y $l(t)$), además de esa amortiguación para la formación de ángulo de ataque negativo.

Una vez explicada la secuencia de movimientos, se presentan los resultados obtenidos para ambas estructuras para así poder seguir con la comparativa:

	Punto de flameo	
	Placa plana	Estructura articulada
V_f (m/s)	10,22	13,58
T_f (s)	0,07	0,09
f_f (Hz)	14,29	10,93

Tabla 3.6: Punto de flameo para estructura articulada y placa plana de $c = 12$ cm

A la vista de los resultados, en primer lugar se puede apreciar que para la estructura articulada la velocidad de flameo es mayor que para el caso de una sola placa. Esto quiere decir que conforme se incrementaba la velocidad del flujo incidente, ésta tardó más en experimentar el fenómeno del flameo. Las razones de ello son varias.

De una mano, viene de la mayor estabilidad que la segunda placa dotaba a la estructura general. Como se ha podido ver en la secuencia de movimientos, la segunda placa frenaba la formación de ángulo de ataque negativo en la delantera como consecuencia de la sustentación que generaba. Por ello, en el proceso previo al flameo, el desprendimiento de flujo era mayor en la placa simple propiciando la aparición de esta inestabilidad aeroelástica con anterioridad.

También destacar que se trata de una estructura con mayor presencia que la placa simple, por lo que los efectos desestabilizadores del flujo incidente tardarán más en llegar, como se

puede ver en los resultados obtenidos.

Además, el papel de la placa trasera también es fundamental debido a que, durante el proceso de incremento de velocidad, se podía apreciar como ambas estructuras comenzaban a vibrar. Sin embargo, para el caso de dos placas, éstas no lo hacían de la misma manera, es decir, presentaban diferentes modos vibratorios. Esto se debe también a que las placas no recibían el flujo en el mismo estado, ya que mientras en la delantera incidía el flujo libre, la trasera recibía el flujo perturbado por la primera. Ahora bien, se apreciaba como las dos placas comenzaban un movimiento vibratorio que terminaba por apagarse y volver a repetirse de forma cíclica, en condiciones previas al flameo. La razón de ello se debe a que las frecuencias vibratorias de ambas placas no estaban acopladas una con la otra, por lo que se ponían en contrafase y terminaba por anularse el movimiento. Así, la estructura era capaz de aguantar una mayor velocidad del flujo sin entrar en flameo, cosa que no ocurría con la placa simple, la cual empezaba a vibrar y no contaba con otra placa adherida que anulase el movimiento vibratorio.

Por otro lado, en cuanto al periodo de flameo los resultados obtenidos están dentro de lo esperado, puesto que, aparte de la mayor planta que presenta la estructura articulada, los cuatro grados de libertad principales que componen su movimiento frente a los dos de la placa simple ejercen cierta influencia en la rapidez en la que se repite un ciclo oscilatorio, siendo ésta mayor para la placa plana. Así, para la estructura articulada se tiene un periodo mayor que para la placa simple.

De todo ello también se puede anticipar una de las conclusiones extraídas, y es que el efecto del alargamiento alar, AR , tiene influencia en el fenómeno del flameo. Se observa que estructuras con menor alargamiento son más resistentes a la aparición de este fenómeno, hecho que se analizará en el posterior estudio paramétrico.

Una vez analizado este tipo de configuración, se va a proceder a la comparación de otros sistemas en los que varían algunas variables geométricas.

3.3.2. Estructura articulada de $c = 18$ y 9 cm y placa plana de $c = 18$ cm

Lo que se pretende con esta segunda comparación es verificar las tendencias obtenidas en el caso anterior. Así, aprovechando también el estudio que hizo mi compañero sobre una placa simple con cuerda aerodinámica $c = 18$ cm, se comprobó qué efectos tenía el hecho de añadir una placa de $c = 9$ cm en su borde de fuga.

Para la placa simple, la arandela que dotaba de mayor peso a la estructura se colocó en su parte trasera. Evidentemente, para que la comparación fuera óptima se ha respetado la posición de dicha arandela al añadir la segunda placa.

En este segundo caso, básicamente se analizarán los resultados obtenidos más que el movimiento de las estructuras, ya que la secuencia de la estructura articulada se analizará en el estudio paramétrico y las principales diferencias en el movimiento de ambas configuraciones ya se han comentado en el apartado anterior.

Con todo ello, la disposición de ambas estructuras es la siguiente:

	Placa plana	Estructura articulada
c (m)	0,180	0,280
b (m)	0,395	0,395
AR	2,194	1,411
m_{total} (kg)	0,059	0,083
X_{cdg} (m)	0,107	0,142

Tabla 3.7: Parámetros característicos de cada estructura

Así, si se presta atención a los resultados de la tabla 3.6, lo lógico sería que la estructura articulada resistiera la aparición del flameo y que presentase un mayor periodo oscilatorio y, por consiguiente, una menor frecuencia de flameo.

Para hallar estos parámetros se ha operado de la misma manera que en el caso anterior. Esto quiere decir que para la velocidad de flameo se ha utilizado la presión dinámica del lector digital del control de potencia, para el periodo de flameo se ha observado cuanto tardan las estructuras en realizar un ciclo completo y para la frecuencia de flameo se ha obtenido la inversa del periodo y se han contabilizado los ciclos que realizan en un segundo para contrastar. Con todo ello, los resultados inherentes al punto de flameo de cada caso son:

	Punto de flameo	
	Placa plana	Estructura articulada
V_f (m/s)	11,429	14,625
T_f (s)	0,074	0,086
f_f (Hz)	13,514	11,628

Tabla 3.8: Punto de flameo para estructura articulada de $c= 18$ cm y 9 cm y placa plana de $c = 18$ cm

A la vista de los resultados de la tabla 3.8, se aprecia que las tendencias obtenidas son las mismas. La velocidad de flameo sigue siendo mayor para el caso de la estructura articulada, por lo que se sigue entrando en esa contrafase debida al no acoplamiento de las frecuencias de vibración que retrasa la aparición del flameo y permite operar en condiciones de mayor velocidad que para el caso de una placa plana.

En cuanto al periodo, éste también es mayor para el caso de la estructura articulada ya que el movimiento que se produce durante uno de los ciclos vibratorios es más complejo y la estructura tiene más superficie en contacto con el flujo incidente presentando una interacción mayor con el propio flujo.

Capítulo 4

Estudio Paramétrico

En este capítulo se hace un análisis del impacto que tienen algunas variables en la aparición del flameo para la estructura estudiada. En los capítulos anteriores, se han definido una serie de configuraciones para llevar a cabo los diferentes ensayos realizados. En ese sentido, hay que destacar el hecho de que, durante las fases de diseño de una aeronave cuando se realizan los estudios aeroelásticos, se obtiene la sensibilidad que ofrecen algunos parámetros resultando determinante en adoptar un tipo de configuración u otra.

Por ello, durante este capítulo se va a ver como afecta la variación de algunos parámetros en lo que a criterios de inestabilidad se refiere. Así, cuando se ha estudiado el efecto de variación de alguno ellos se ha procurado que las condiciones de ensayo sean exactamente las mismas para que la comparativa que se establece sea óptima. Esto hace referencia a prestar atención a la disposición en el túnel de viento con ángulo de ataque nulo, a la utilización de los mismos muelles en las mismas posiciones por las posibles pequeñas diferencias que puedan presentar o a respetar ese centímetro de juego permitido entre ambas placas.

Así, primero se ha procedido a la variación de la posición del Centro de Gravedad, parámetro conocido como esencial en la dinámica, ya no solo de un ala, si no de una aeronave en general. Ello se ha conseguido con el desplazamiento de la arandela que dotaba de mayor peso a la estructura.

Por otro lado, se ha estudiado el efecto del alargamiento alar mediante la modificación de la cuerda aerodinámica de la estructura. Este parámetro también tiene gran importancia a la hora de diseñar un ala, según se quiera unas prestaciones u otras. Dentro de esta sección se podrá ver la comparativa entre estructuras compuestas por dos placas del mismo tamaño, variando la cuerda para cada caso, y también con la utilización de una misma placa delantera y una trasera de diferentes medidas.

En definitiva, este estudio paramétrico no deja de tener la finalidad de investigar más sobre el fenómeno del flameo, las condiciones en las que se produce y su impacto en ciertas estructuras.

4.1. Variación de la posición del Centro de Gravedad

Como se comentado en la introducción de este capítulo, uno de los parámetros que se han variado para conocer su impacto en la aparición del flameo es la localización del centro de gravedad de la estructura.

Según la documentación empleada, en la fase de diseño preliminar es fundamental que la aeronave tenga unas buena características de control y estabilidad y una adecuada flexibilidad operativa. Para ello, se debe conocer el Centro de Gravedad de la aeronave en cuestión y como varía su posición en las distintas fases del vuelo, [3].

En nuestro caso, no habrá fases de vuelo en las que se gaste combustible y provoque el desplazamiento del centro de gravedad. Sin embargo, para cada uno de los dos ensayos realizados, se probará una posición diferente para ver el impacto que tiene en el establecimiento de límites para éste simulando ese desplazamiento, ya que es un parámetro controlado, con extremos superior e inferior claramente definidos que no deben superarse. En ese sentido, aparte de favorecer la estabilidad longitudinal de la aeronave, uno de los criterios de establecimiento de dichos límites es la capacidad de controlar la aparición del flameo.

Aprovechando la ocasión, hay que mencionar que algún que otro accidente aéreo se ha producido por exceder dichos límites de la posición del centro de gravedad. Este el caso del vuelo 628 de LACSA en 1988 entre San José-Managua-Miami, donde un Boeing 727-100 no terminó de realizar el despegue, ya que fue abortado por el piloto al no conseguir rotar el avión debido a una carga mal repartida a lo largo de la aeronave. Ello propició que el centro de gravedad se adelantara excesivamente, no se pudiera elevar el morro y la potencia de despegue fuera diferente. Así, el avión se salió de la pista y terminó en un terreno frente a ella alzándose en llamas y quedando destrozado. Afortunadamente, los 24 ocupantes salieron con vida y, a pesar del aspecto del avión tras el accidente, se supo que la decisión del piloto fue acertada y evitó males mayores.



Figura 4.1: Accidente del vuelo 628 de LACSA

Como se ha visto, la posición del centro de gravedad es un parámetro muy sensible que puede acarrear consecuencias devastadoras. Por ello, debido a la importancia de este parámetro en la estabilidad de estructuras es por lo que se ha procedido al estudio de su influencia, en este caso, para condiciones de flameo.

Volviendo a nuestra estructura, para variar la posición del centro de gravedad se ha desplazado la arandela en dos posiciones diferentes a lo largo de la cuerda. Para este estudio se ha utilizado una placa delantera de $c = 18 \text{ cm}$ y una trasera de $c = 9 \text{ cm}$. La envergadura de ambas estructuras es de $b = 39,5 \text{ cm}$, siendo esta la misma para todos los casos de estudio. La razón de ello reside en que se ha querido adoptar todo el ancho de la zona de medida del túnel de viento para evitar que se formarán torbellinos en los extremos de la placa que afectarán a la dinámica del movimiento. Así, las posiciones adoptadas por la arandela han sido detrás de la primera placa y detrás de la segunda, presentando las siguientes configuraciones:

	Estructura 1	Estructura 2
$c \text{ (m)}$	0,280	0,280
$b \text{ (m)}$	0,395	0,395
AR	1,411	1,411
$m_{total} \text{ (kg)}$	0,083	0,083
$X_{cdg} \text{ (m)}$	0,142	0,157

Tabla 4.1: Parámetros característicos de cada estructura articulada variando X_{cdg}

Destacar que la posición del centro de gravedad es el de la estructura global, pero que la importancia aquí reside en que la arandela que dotaba de más peso se ha cambiado de una placa a otra, hecho que tiene un gran impacto, por poco que se varíe el centro de gravedad global, como se podrá ver en los resultados expuestos en esta sección.

Esto se debe a que, al tratarse de una estructura compuesta por dos partes que presentan dos modos de vibración diferentes debido al distinto estado en el que reciben el flujo, la variación de las propiedades de ambas partes ejercerá influencia en su comportamiento. Esto quiere decir que al cambiar la arandela de una placa a otra, aunque la variación del centro de gravedad sea mínima, las frecuencias de vibración cambiarán y por tanto, las condiciones de flameo también. Por consiguiente, este tipo de estudio también sirve en parte para analizar las características másicas del sistema. Los resultados son:

	Punto de flameo	
	Estructura 1	Estructura 2
$V_f \text{ (m/s)}$	14,625	12,450
$T_f \text{ (s)}$	0,086	0,081
$f_f \text{ (Hz)}$	11,628	12,346

Tabla 4.2: Punto de flameo para cada estructura articulada variando X_{cdg}

A la luz de los resultados de la tabla 4.2, en efecto esa mínima variación del centro de gravedad junto con el hecho de dotar de más peso a la placa trasera y quitárselo a la delantera,

ha tenido influencia en la entrada en condiciones de flameo.

Así, como se puede apreciar, para el caso en el que colocábamos la arandela en la parte trasera de la placa de $c = 9 \text{ cm}$ (Estructura 2) el fenómeno del flameo aparece a menores velocidades debido a que las frecuencias vibratorias se acoplaban antes y la estructura comenzaba a vibrar en mayor medida.

Una peculiaridad en el movimiento de la Estructura 2 se producía una vez entraba en condiciones de flameo. Realmente ocurría para ambos casos como se podrá ver en la siguiente sección cuando se varíe la cuerda de la placa trasera, pero se acentuaba más cuando la arandela estaba en dicha placa. La cuestión es que conforme se incrementaba la velocidad el comportamiento de ambas estructuras era el mismo. Sin embargo, una vez se llegaban a condiciones de flameo para cada una de ellas, la Estructura 2 describía un movimiento más desatado que la Estructura 1. Es por ello por lo que el periodo de flameo es menor, porque consigue realizar un ciclo antes debido a la inestabilidad que le proporciona esa masa adicional trasera. Esto se analizará de forma más detallada en la siguiente sección, donde se incurrirá en la estabilidad de la placa trasera.

4.2. Variación del alargamiento

Como se ha expuesto en la introducción de este capítulo, se ha analizado el impacto de variar el alargamiento de las estructuras articuladas en su entrada en condiciones de flameo.

En el campo de la aeronáutica, el alargamiento alar es la proporción entre la longitud y la anchura media del ala. Resulta ser un valor decisivo para la resistencia inducida, y por tanto para el coeficiente de planeo o equivalentemente la eficiencia del ala. Es un parámetro adimensional que influye en el diseño del avión en varios aspectos y es por ello por lo que se ha estudiado su variación.

Para variar el alargamiento a lo que se ha hecho es modificar la cuerda aerodinámica de las estructuras, ya que la envergadura se ha mantenido para todos los casos en $b = 39,5 \text{ cm}$. Además de esto, hay que tener en cuenta un par de factores más.

Uno de ellos es que variando la cuerda geométrica evidentemente se está añadiendo más masa. Sin embargo, esta adición de masa es en la misma proporción y la diferencia de comportamientos se deberá a dicha cuerda geométrica.

El otro, es que para que el estudio sea óptimo, como en casos anteriores la posición de la arandela se va a respetar fijándola al final de la placa delantera, configuración ya conocida y analizada en previos capítulos.

Así, dentro de esta sección se van a analizar dos casos. En uno de ellos se emplearán estructuras donde ambas placas midan lo mismo para ver el efecto del alargamiento global de la estructura. Para este caso se compararán estructuras con placas de $c = 12 \text{ cm}$ y con placas de $c = 18 \text{ cm}$. El otro se centrará en la cuerda de la placa trasera, la cual también ejerce influencia en el movimiento que describe la estructura, además de en las condiciones de entrada en flameo.

4.2.1. Variación de la cuerda de ambas placas en igual proporción

En este apartado se analizan y comparan una estructura compuesta por placas de $c = 12 \text{ cm}$ y otra por placas de $c = 18 \text{ cm}$, ambas con la arandela situada en la parte trasera de la primera placa.

Esta elección resulta la más idónea puesto que se podría variar el alargamiento utilizando placas delanteras y traseras de diferentes tamaños consiguiendo distintos valores para esta variable. Sin embargo, para que el análisis sea óptimo, ambas placas deben variar su cuerda geométrica en la misma medida ya que cada una de ellas tiene su función propia en la dinámica del movimiento.

Los principales parámetros de las configuraciones ensayadas son los que se recogen en la siguiente tabla:

	Estructura 1	Estructura 2
$c \text{ (m)}$	0,250	0,370
$b \text{ (m)}$	0,395	0,395
AR	1,580	1,068
$m_{total} \text{ (kg)}$	0,063	0,107

Tabla 4.3: Parámetros característicos de cada estructura articulada variando AR

Lo primero de todo es mencionar que los movimientos descritos por ambas estructuras cuando entraban en condiciones de flameo eran similares, produciéndose la secuencia mostrada en la figura 3.6. Ello refuerza lo expuesto al principio del apartado en la elección de estructuras.

Por otro lado, como se aprecia en la tabla 4.3, para la Estructura 2 el alargamiento es menor debido a su mayor cuerda aerodinámica. Como ya se adelantó en la sección 3.3 cuando se comparó el caso de la placa plana y la estructura articulada, lo esperado sería que esa Estructura 2 fuera más resistente a la aparición del flameo debido a sus condiciones geométricas. Así, mediante la siguiente tabla de resultados se podrá comprobar y sacar conclusiones sobre ello:

	Punto de flameo	
	Estructura 1	Estructura 2
$V_f \text{ (m/s)}$	13,583	16,162
$T_f \text{ (s)}$	0,092	0,113
$f_f \text{ (Hz)}$	10,928	8,849

Tabla 4.4: Punto de flameo para cada estructura articulada variando AR

Observando los resultados de la tabla 4.4, la tendencia adoptada está dentro de lo esperado. Se ha hecho incapié en este tema, ya que para el caso de la estructura compuesta por dos placas de $c = 18 \text{ cm}$ se obtuvieron resultados un tanto incoherentes con la dinámica del resto de los estudios durante los primeros ensayos. Ello pudo deberse a diversas razones como

una disposición diferente en el túnel de viento en cuanto al ángulo de ataque o a una diferente elongación inicial de los muelles al fijar las ventosas de otra forma. Sin embargo, tras varios intentos en los que esa tendencia marcada por un retraso en la aparición del flameo cuando menor era el alargamiento no se producía, se pudieron mejorar las condiciones de medida y montaje para al final llegar a estos resultados, comprobados en varios ensayos. Y es que con el trabajo experimental hay que ser muy riguroso o se pueden obtener resultados que carezcan de veracidad.

Volviendo a la cuestión principal, el menor alargamiento de la Estructura 2 supone un retraso en la entrada en condiciones de flameo, es decir, una capacidad para soportar velocidades mayores del flujo incidente sin que se produzca la inestabilidad aeroelástica. Esto tiene que ver en parte a que el flujo de aire tiene más superficie que recorrer y llega perturbado al borde de fuga de la estructura en una posición más atrasada.

Recordando que lo que originaba la entrada en flameo era la generación de un ángulo de ataque positivo en la placa delantera que iba en progresivo aumento hasta entrar en pérdida, cuando la placa delantera presenta una cuerda mayor ese proceso tarda más en llegar y por tanto es otra de las razones por las que la velocidad de flameo es mayor para el caso de la Estructura 2.

En cuanto al periodo oscilatorio también se cumple lo esperado. A la Estructura 2, al contar con mayor voluminosidad, le cuesta más completar uno de los ciclos vibratorios, ya que los efectos de amortiguación producidos por ambas placas se incrementan y tarda más en ello. Este dato se ha obtenido, como en los casos anteriores, de los vídeos a cámara lenta que permiten ver la secuencia completa.

Finalmente, en lo referente a la frecuencia, se ha extraído del dato del periodo de flameo ya que, a pesar de que contabilizando los ciclos que se producen en un segundo se obtienen valores cercanos, éste es un método más exacto debido a la visualización concreta del paso del tiempo durante el vídeo, lo que permite fijar los instantes precisos.

4.2.2. Variación de la cuerda de la placa trasera

Como se ha expuesto en la introducción de esta sección, se han realizado varios ensayos donde lo que se probaba era variar la cuerda de la placa trasera y con ello el alargamiento, AR , para ver que influencia tenía en el fenómeno del flameo.

El motivo principal de esta comparativa surgió a lo largo de la realización del proyecto. En un principio no era un objetivo fijado, el cual abarcaba el caso anterior. Sin embargo, conforme se iban obteniendo resultados y, en mayor medida, se iba observando las secuencias oscilatorias mediante los vídeos a cámara lenta, se apreció que la longitud de la placa trasera con respecto a la delantera ejercía cierta influencia en el comportamiento de la estructura.

Evidentemente, cuanto mayor fuera la longitud de la placa trasera las condiciones de flameo iban a tardar más en aparecer, puesto que eso ya se había contrastado con diferentes casos e incluso en el estudio sobre una sola placa: un menor alargamiento, AR , implicaba una mayor resistencia a la entrada en flameo. Sin embargo, lo que llamó la atención de ello con respecto al

caso de dos placas iguales fue el movimiento descrito, hecho mencionado al final de la sección 4.1.

En dicha sección, se exponía que cuando la arandela adicional se encontraba en la placa trasera el movimiento descrito por la estructura era más desatado una vez se encontraba en condiciones de flameo, lo que justificaba su menor periodo de flameo. Ello era cierto pero, sin embargo, ese movimiento brusco también se daba, aunque en menor medida, en la misma estructura cuando la arandela estaba en la placa delantera. La razón de esto reside en la menor longitud de la placa trasera con respecto a la delantera, lo que también se puede contrastar con el caso de una sola placa, que presentaba movimientos similares, ya que no contaba con una placa trasera que la dotara de “estabilidad” durante el flameo. El término anterior está entre comas puesto que realmente la estructura está envuelta en una inestabilidad aeroelástica y el sistema no es estable durante el proceso.

Un último detalle a destacar es que para la placa trasera se probaron longitudes de cuerda bastante reducidos, pero casi no se apreciaban del todo bien los efectos de esa placa que hacía de flap. Por ello, se fijó que la cuerda de esa placa tuviera como mínimo el 50 % de longitud de la delantera.

Después de esta introducción sobre los motivos de esta comparativa se procede a presentar las configuraciones ensayadas, donde la placa delantera tenía cuerda $c = 18 \text{ cm}$ y las traseras $c = 9 \text{ cm}$ y $c = 18 \text{ cm}$ respectivamente, para después analizar los resultados y comparar ambos casos:

	Estructura 1	Estructura 2
$c \text{ (m)}$	0,280	0,370
$b \text{ (m)}$	0,395	0,395
AR	1,411	1,068
$m_{total} \text{ (kg)}$	0,083	0,107

Tabla 4.5: Caracterización de cada estructura articulada variando la cuerda de la placa trasera

Como se puede ver en la tabla 4.5, son estructuras que ya han sido analizadas pero que ahora van a ser comparadas entre sí por lo explicado anteriormente.

De esta forma, primero se presentará la secuencia de movimientos descrita durante un ciclo oscilatorio para el caso de la placa trasera de $c = 9 \text{ cm}$ y después se analizará el punto de flameo de ambas.

Comenzando con la Estructura 2 de la tabla 4.5, el ciclo que realiza la misma es similar al de la figura 3.6, que mostraba el movimiento en condiciones de flameo de una estructura compuesta por placas de $c = 12 \text{ cm}$.

Recordando un poco, la placa delantera iba adoptando un ángulo de ataque positivo cada vez mayor hasta superar el crítico y entrar en pérdida. Seguidamente, la estructura se desplazaba longitudinalmente en la dirección del flujo como consecuencia del desplazamiento que experimentaba la placa trasera. Siguiendo con el movimiento, la estructura adoptaba un ligero ángulo de ataque negativo debido a la entrada en pérdida producida anteriormente. No

obstante, el incremento de sustentación global generado por la trasera y la estabilidad dotada por la misma generaban que ese ángulo de ataque negativo fuera muy reducido. Finalmente, la estructura recuperaba su posición de equilibrio para volver a empezar un nuevo ciclo vibratorio.

Para la Estructura 1 de la tabla 4.5, se tiene el siguiente movimiento:

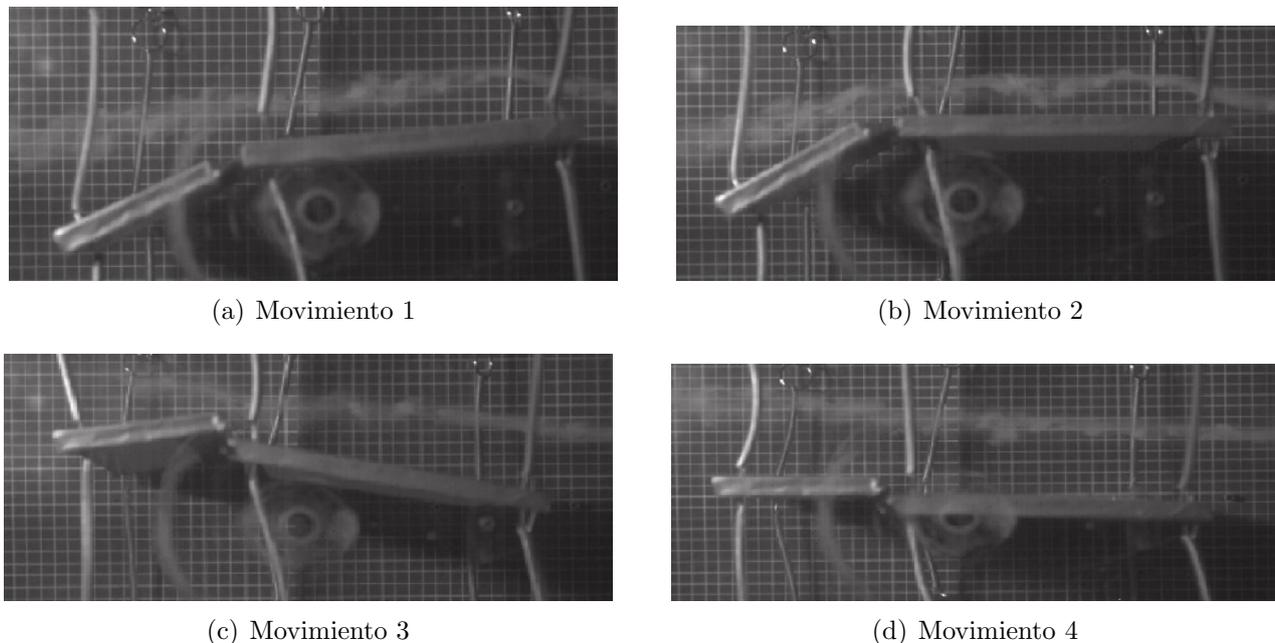


Figura 4.2: Secuencia de movimientos de otra estructura articulada en condiciones de flameo

A la luz de las imágenes, se trata de una secuencia algo diferente a la mostrada en la figura 3.6. Así pues, se procede a comentar las principales diferencias.

En líneas generales, ya no solo por medio de las imágenes sino también a través de la visualización del vídeo, se aprecia que en este caso el grado de libertad referente al desplazamiento vertical, $h(t)$, es mucho más notorio que el referente al horizontal, $l(t)$, y ello evidentemente es debido a la menor longitud de la placa trasera con respecto a la delantera. Además, la placa trasera presenta menor independencia en el movimiento global de la estructura pues es arrastrada en mayor medida por la delantera.

En cuanto al **Movimiento 1** de ambos casos, la placa delantera sigue adoptando un ángulo de ataque positivo hasta superar el de entrada en pérdida. Sin embargo y como se ha dicho, en la figura 4.2 se ve como la placa trasera también lo adquiere cosa que antes no ocurría, ya que ésta se deja llevar.

En el **Movimiento 2** de la figura 4.2 se observa que una vez entra en pérdida la placa delantera, ésta pasa por su posición de equilibrio (ángulo de ataque nulo) antes de adoptar ese ángulo de ataque negativo característico. No obstante, esa posición de equilibrio se produce en una posición mucho más elevada que en la figura 3.6, producida por el mayor desplazamiento vertical experimentado por la estructura durante la secuencia oscilatoria. En ese sentido, la

placa trasera no conseguía dotar de estabilidad a la delantera por sus menores medidas provocando la mayor sacudida de ésta. Asimismo, la placa trasera sigue en posición de ángulo de ataque positivo y nunca terminará por estabilizarse del todo ya que la violencia del movimiento no se lo permite.

Otra de las principales diferencias es la que se ve durante el **Movimiento 3** de ambos casos. En párrafos anteriores se ha comentado que el ángulo de ataque negativo adoptado por la placa delantera cuando entraba en pérdida era muy reducido debido a los efectos de la placa trasera cuando ambas placas medían lo mismo. Ello era debido a que durante el movimiento esa placa trasera ayudaba en la estabilidad global del sistema y generaba un aumento de la sustentación evitando que la placa delantera se precipitara hacia abajo.

Sin embargo, para este caso la función ejercida por la placa trasera es bastante menor y se puede ver como la placa delantera adquiere un ángulo de ataque negativo bastante más pronunciado. En lo referente a la trasera, ésta sigue dejándose llevar por la secuencia con apenas control.

Finalmente, en el **Movimiento 4** de la figura 4.2, la placa delantera vuelve a su posición de equilibrio para comenzar de nuevo el ciclo, sin ser esta la misma que la del **Movimiento 2** por ese desplazamiento vertical. La placa trasera sigue sin estabilizarse y se encuentra a merced de la inestabilidad aeroelástica.

En definitiva, una mayor longitud de la placa trasera dota de más estabilidad al sistema en condiciones de flameo describiéndose un movimiento diferente, menos caótico y menos brusco, caracterizado por un desplazamiento horizontal en mayor medida en lugar de uno vertical. No obstante, la utilización de una placa trasera sí que ayuda a retrasar la entrada en flameo como se vio en la sección que se comparaban una placa plana con una estructura articulada.

Con todo ello, se presentan los resultados propios del punto de flameo de ambas estructuras:

	Punto de flameo	
	Estructura 1	Estructura 2
V_f (m/s)	14,625	16,162
T_f (s)	0,086	0,113
f_f (Hz)	11,628	8,849

Tabla 4.6: Punto de flameo de cada estructura articulada variando la cuerda de la placa trasera

Como se aprecia en la tabla 4.6, los resultados hallados se encuentra dentro de lo lógico y esperado, siguiendo con la tendencia obtenida a lo largo de todo el estudio.

Así, la Estructura 1 entra en condiciones de flameo con anterioridad debido a esa menor influencia de la placa trasera. Asimismo, el periodo de flameo, T_f , también es menor puesto que esa placa trasera se deja llevar por el movimiento y facilita en mayor medida la realización de uno de los ciclos vibratorios. En cuanto a la frecuencia de flameo, f_f , va ligada al periodo y da a entender que la Estructura 1 que es la más ligera esa capaz de repetir un mayor número de

ciclos durante un segundo.

Esta comparativa ha servido para investigar más sobre la aparición del flameo y para ver la influencia de cada placa del sistema estudiado, por encima del comportamiento global que presenta una estructura compuesta por placas articuladas.

En definitiva, no es otra forma de ver el impacto del alargamiento, AR , el cual influye directamente en la entrada en condiciones de flameo produciéndose ésta con anterioridad cuanto mayor es ese alargamiento.

Capítulo 5

Presupuesto económico

En este capítulo se estudiará cual es el impacto económico del estudio realizado. En ese sentido, hay que contextualizar la situación y abrir los diferentes frentes en los que se requiera el establecimiento de dicho presupuesto.

Evidentemente se trata de un trabajo académico sin ánimo de lucro alguno. Sin embargo, para poder establecer el coste del proyecto se pueden plantear ciertas ocasiones hipotéticas. Así, cuando una empresa encarga un proyecto, ya no solo de ingeniería, o más bien dispone de una serie de fondos para la investigación como puede ser el caso, siempre se establece un presupuesto previo para conocer el alcance económico que pueda llegar a tener y estudiar si es factible o no llevarlo a cabo.

Por consiguiente, a la hora de trazar el presupuesto se ha de hacer una estimación de las distintas variables a tener en cuenta. En este caso más que una estimación se aportarán los datos reales una vez ha finalizado el proyecto y se conocerá el coste exacto del mismo.

Esas variables son las que intervienen en todas y cada una de las cuatro grandes fases del proyecto y engloban tanto costes de material y montaje como los costes por hora del personal involucrado y del uso de equipamiento especial. Las fases queda descritas según el siguiente orden:

1. La primera fase del proyecto abarca la recopilación previa de información, es decir, todo aquello que pueda servir como precedente para optimizar los diferentes procesos en los que se envuelve el proyecto. En esta fase se hace una investigación sobre aquellos proyectos similares, qué impacto han tenido, cuál ha sido su dinámica y cómo se han llevado a cabo. Asimismo, se busca toda la información que pueda servir de apoyo. De esta forma, se pueden fijar los objetivos del proyecto y sentar las bases de la metodología a seguir además de anticipar una posible reducción de costes.
2. La siguiente fase engloba el estudio experimental del caso. En este punto del proyecto se dispone todo aquello que ha sido necesario para realizar los ensayos en el túnel de viento, desde la labor de montaje y coste de material, hasta tiempo dedicado por alumno y tutor para el correcto desarrollo del proceso.
3. La tercera de la fases hace referencia al procesamiento y análisis de datos. De esta forma, se lleva a cabo la contrastación de los resultados obtenidos experimentalmente y se establecen

las conclusiones a las que ha dado lugar el estudio haciendo un balance global de todo el proceso.

4. La última fase es la de revisión final y presentación de cara al público. Como todo proyecto, una vez ha sido realizado siempre se requiere que sea mostrado remarcando los puntos clave y haciendo un resumen global de las partes que consta con el fin de consolidarse. Previo a ello se hace una revisión para asegurarse que se han cumplido los objetivos y que éstos han sido expuestos de una forma óptima y fiable, eliminando posibles errores.

Una vez descritas las fases del proyecto, se van a desglosar los dos grandes bloques que abarcan los gastos económicos del mismo para luego presentar su coste total.

5.1. Presupuesto del estudio experimental

Al ser un trabajo de carácter experimental, es importante definir el impacto económico de este bloque. De esta manera, se contabilizarán tanto el coste de los diferentes materiales que se han empleado para el montaje de la estructura como el del equipamiento utilizado para la toma de medidas y el correcto desarrollo del proyecto.

Por ello, primero se presentan en la siguiente tabla los costes referentes al material de montaje en los que también se incluyen las herramientas de taller empleadas:

Estructura			
Cantidad	Motivo	Precio (€/ud.)	Coste (€)
1	Espuma <i>deprom</i>	15,95	15,95
2	Muelle 1 m	3,30	6,60
1	Cinta adhesiva americana	5,35	5,35
3	4×Anillo Partido Ø22mm	1,55	4,65
6	2×Ventosa Acero Ø35mm	1,70	10,20
1	Arandela metálica	1,45	1,45
1	Rollo de alambre	0,60	0,60
1	Material de taller	25	25
TOTAL			69,80 €

Tabla 5.1: Presupuesto para el montaje de la estructura

Como se puede apreciar en el desglose de precios de la tabla 5.1 y como se comentó anteriormente, la elección de materiales ha resultado idónea ya que, con el reducido coste que ha supuesto se ha podido llevar a cabo un estudio óptimo sobre un fenómeno tan importante como el flameo. Por ello, destacar la faceta ingeniosa, ya no sólo mía sino también del resto de compañeros involucrados en el proyecto así como del tutor en su labor de aportar sugerencias y servir de guía en algunos aspectos.

Siguiendo con el presupuesto del estudio experimental, a continuación se muestra el coste económico del equipamiento disponible en el Centro de Máquinas y Motores Térmicos de la UPV según el tiempo de utilización del mismo, donde se incluyen tanto las horas de servicio del túnel de viento y la máquina de humo, como la utilización de la cámara de alta velocidad conectada al ordenador y tratada con un programa informático específico:

Equipamiento			
Tiempo (h)	Motivo	Precio (€/h)	Coste (€)
30	Túnel de viento cerrado	50	1500
5	Máquina de humo	20	100
15	FastCam APX, Photron	20	300
15	Ordenador	15	225
15	Programa informático	30	450
TOTAL			2575 €

Tabla 5.2: Presupuesto para los equipos de medida

Una vez expuesto el presupuesto referente al estudio experimental del caso, se va a presentar el otro gran bloque que representa el mayor peso económico del proyecto.

5.2. Presupuesto de salarios y tiempo dedicado por el alumno

En esta sección se considerarán tanto el salario del tutor del proyecto como la estimación económica del trabajo del alumno ajustándose al número de horas dedicadas al propio proyecto.

En lo referente al trabajo del alumno, se trata de un proyecto de 12 créditos ECTS, correspondiéndose con un total de 300 horas de trabajo (25 horas cada crédito). En ese tiempo se contemplan todos los aspectos a la realización del proyecto, contando con la búsqueda de información y documentación previa, el diseño de la estructura y el montaje de la misma, el estudio experimental del caso, la interpretación de resultados, la extracción de conclusiones y la redacción de la información.

A ello también hay que sumarle una serie de horas extra dedicadas al trabajo con el fin de perfeccionarlo, en las que se incluyen la revisión global del contenido para evitar cualquier error, cuidar los detalles y hacer las correcciones pertinentes y la realización de la presentación con sus correspondientes ensayos para una buena exposición del caso.

Así, en la siguiente tabla queda reflejado el coste económico de esta sección:

Salarios			
Tiempo (h)	Motivo	Precio (€/h)	Coste (€)
300	Proyecto	50	15000
70	Horas extra del proyecto	60	4200
60	Trabajo del tutor	60	3600
TOTAL			22800 €

Tabla 5.3: Presupuesto de salarios

Una vez se han desglosado económicamente todas las partes del proyecto, se esta en disposición de agruparlas y ofrecer el coste total del producto.

5.3. Presupuesto total

Como se ha comentado, en esta sección se va a ofrecer el presupuesto total para la realización de este proyecto, al que habrá que sumarle el 21 % de IVA estipulado:

Presupuesto	
Motivo	Coste (€)
Estructura	69,8
Equipamiento	2575
Salarios	22800
Subtotal	25444,8
IVA (21 %)	5343,41

TOTAL 30788,21 €

Tabla 5.4: Presupuesto total del proyecto

Capítulo 6

Conclusiones y trabajos futuros

El último de los capítulos de este proyecto abarca dos puntos a tomar en consideración. Por un lado, se exponen las conclusiones a las que se llegan tras la interpretación tanto de los resultados como de toda la información disponible con la finalidad de verificar si se han cumplido los objetivos marcados en el primer capítulo y realizar una visión global de lo que ha sido el proyecto. Por otro, se presentan los posibles trabajos derivados de éste que se podrían realizar en un futuro, buscando la adaptación y la relación del estudio a otro tipo de proyectos.

6.1. Conclusiones

Antes de comenzar con esta sección es necesario remarcar el hecho de que las diferentes conclusiones a las que se ha podido llegar vienen condicionadas por la posible incertidumbre en la toma de medidas. Ello quiere decir que, a pesar de la rigurosidad adoptada en la realización del trabajo experimental, hay que tener en cuenta una serie de factores que han podido causar alguna discrepancia en los resultados hallados durante los ensayos y, por tanto, en la obtención de conclusiones. Entre esos factores se pueden destacar el diferente alineamiento de la estructura entre un ensayo y otro, ya que resultaba difícil colocarla exactamente igual en todas las ocasiones, el hecho de que los muelles presentaran constantes de rigidez diferentes debido o bien a las pequeñas diferencias en sus longitudes y elongaciones iniciales durante los ensayos, o bien al desgaste generado en los mismos, y la articulación no ideal entre las dos placas ya que se había creado con cinta americana y su comportamiento no era siempre el mismo.

Como se ha establecido, la finalidad de esta sección es la validación de los objetivos marcados. Recordando cuales fueron fijados, por un lado se tiene la investigación experimental del fenómeno del flameo sobre una estructura dada y por otro tanto el estudio de la sensibilidad del problema ante la modificación de ciertas variables de interés como la determinación ejercida por la placa trasera de la estructura tras su comparación con el caso de una sola placa.

Empezando por el primero de ellos y a la vista de todos los capítulos anteriores parece que ha quedado más que cumplido. El hecho de querer investigar sobre el fenómeno del flameo venía de varias razones. Una de ellas era el creciente desarrollo en el que se halla el campo de la aeronáutica, el cual se encuentra estrechamente ligado a la innovación. En ese sentido, aparecía el fenómeno del flameo ya que es el más difícil de predecir y uno de los más importantes puesto que puede tener consecuencias devastadoras. Por ello, todavía hoy en día se siguen investigan-

do métodos de control e identificación del flameo en estructuras, siendo éste uno de los puntos críticos en las fases de diseño.

Asimismo, ese interés también fue despertado por los contenidos vistos en la asignatura de *Aeroelasticidad*, con los cuales se pudo ver teóricamente en que consistía este fenómeno y como modelarlo con algunas simplificaciones. Debido a ello, para dar un paso más hacia delante, se decidió a estudiar experimentalmente el flameo para ver en qué condiciones se daba y cómo se producía.

Así pues, tras los numerosos ensayos realizados en el túnel de viento con estructuras que adoptaban distintas configuraciones, y gracias a todo el equipamiento utilizado, se pudo lograr una percepción visual del proceso, lo que claramente satisface uno de los objetivos marcados ya que se ha adquirido ese conocimiento de apoyo a los fundamentos teóricos del fenómeno en cuestión.

Tras la obtención de resultados y el análisis de la secuencia de movimientos descrita por la estructura articulada durante uno de los ciclos vibratorios que se daban en condiciones de flameo, se procedió a establecer una comparativa con el caso en el que la estructura sólo estaba conformada por una placa plana. La finalidad de ello era ver la influencia que ejercía esa placa trasera que hacía el papel de flap.

Por un lado, al añadir otra placa en el borde de fuga de la placa plana se conseguía un menor alargamiento en la estructura. Este propio hecho ya se había analizado en el estudio paramétrico sobre una sola placa, y se llegó a la conclusión de que cuanto menor era el alargamiento la entrada en condiciones de flameo se producía más tarde y, por tanto, la estructura era capaz de aguantar velocidades de flujo mayores antes de volverse inestable, [7].

No obstante, este dato ya era conocido y la comparación se decidió enfocar hacia otros puntos. En ese sentido y gracias a los vídeos obtenidos de la cámara de alta velocidad, se pudo apreciar que la secuencia de movimientos que describían una y otra estructura durante el movimiento oscilatorio en condiciones de flameo era diferente.

Para el caso de la placa plana se describían los dos grados de libertad previamente anticipados, el desplazamiento vertical y el giro de la placa. Ello resultaba coherente puesto que a lo largo de los años dentro del campo de la aeroelasticidad se han estudiado modelos que representan el comportamiento ideal de ciertos sistemas físicos. Así, el modelo del *perfil equivalente* se basaba en el trabajo con una de las secciones de ala, de forma que los resultados que se obtenían podían extrapolarse como válidos para toda el ala. Esa sección presentaba la dinámica de un sólido rígido que describía los dos grados de libertad expuestos al principio del párrafo. Por ello, como en el estudio de alas se toma la envergadura como una medida mucho mayor que el espesor y todos los puntos del perfil se pueden considerar que forman parte de la misma línea, la tendencia descrita por una placa plana se ajusta a los modelos implementados para un perfil alar. Por consiguiente, debido a ello y la disposición mediante muelles según establecían dichos modelos, el comportamiento de la placa plana se ajustó a lo que se esperaba.

Sin embargo, para el caso de la estructura articulada la secuencia de movimientos era dife-

rente. En ese sentido entraban en juego dos grados de libertad más que modifican la trayectoria del movimiento, el giro de la placa trasera el cual era de esperar y el desplazamiento horizontal de la estructura. Ello evidentemente venía de la placa trasera, la cual dotaba de más estabilidad al sistema en su entrada en condiciones de flameo.

La estructura comenzaba a flamear cuando la placa delantera superaba el ángulo de ataque crítico y entraba en pérdida. Ahora bien, se apreciaba que la placa trasera permanecía prácticamente en su posición de equilibrio mientras recibía el flujo perturbado. Cuando la placa delantera entraba en pérdida, la trasera desplaza la estructura en sentido del flujo incidente y dotaba de una mayor sustentación global haciendo que el ángulo de ataque negativo que se adoptaba fuera muy reducido, a diferencia del caso de una sola placa.

En cuanto al punto de flameo, los resultados se ajustaban a lo esperado y la estructura articulada resistía flujos de aire más rápidos debido al no acoplamiento de las frecuencias de oscilación que provocaba que el movimiento vibratorio se apagara y se volviera a iniciar cíclicamente. El periodo de flameo era mayor para las placas articuladas por la mayor complejidad del movimiento descrito.

Después de ello, se procedió a realizar un estudio paramétrico del caso y, concretamente, se modificó por un lado la posición del centro de gravedad y por otro el alargamiento de la estructura, probando también diferentes cuerdas geométricas para la placa trasera.

Comenzando por la posición del centro de gravedad de la estructura, destacar que en aviación se trata de un parámetro muy sensible que tiene unos límites fijados los cuales no deben ser superados en ningún caso ya que ello podría afectar a la estabilidad general de la aeronave y es por ello por lo que se ha decidido ver su influencia.

Así, se observó que cuanto más retrasado estaba el centro de gravedad con respecto al borde de ataque antes se entraba en condiciones de flameo. Además, para modificar dicho centro de gravedad se cambió la arandela adicional que dotaba de mayor peso a la estructura de la placa delantera a la trasera y, aunque la variación de la posición global fuera mínima los efectos sí que eran notorios. Ello se debía también a que cuando la arandela estaba en la placa trasera las frecuencias de oscilación se acoplaban antes y, por consiguiente, se entraba antes en condiciones de flameo.

En lo referente al alargamiento, un menor valor de éste provocaba que la estructura se inestabilizara con velocidades mayores del flujo incidente. Al aumentar la cuerda de la estructura, el flujo se desprendía más tarde y por tanto soportaba velocidades mayores. Para variar el alargamiento se probaron dos métodos.

En uno de ellos se variaba la cuerda de dos placas iguales en la misma proporción para ver el efecto global de este parámetros. En este caso, los resultados que se obtuvieron iban acorde con lo esperado y la estructura de menor alargamiento resistía mas la entrada en flameo, describiendo ambas la misma secuencia de movimientos.

En el otro tan solo se modificaba la cuerda de la placa trasera para ver que influencia tenía

en el comportamiento de la estructura. De una mano, la configuración que presentaba una cuerda mayor en la placa trasera siendo ésta igual que la de la delantera aguantaba velocidades de flujo mayores antes de flamear. De otra, cuando la cuerda de la placa trasera era menor, el movimiento que describía era más pronunciado pues se acentuaba mucho más el desplazamiento vertical de la estructura ya que la placa trasera ejercía una menor función estabilizadora. Así, llegaba un punto en el que esa placa trasera se encontraba a merced del movimiento asemejándose al caso de una placa plana y se entraba antes en condiciones de flameo.

En resumen, teniendo en cuenta las incertidumbre en la toma de medidas, las conclusiones que se pueden extraer son las siguientes:

- Las estructuras compuestas por placas articuladas son capaces de aguantar mayores velocidades de flujo que las formadas por una sola placa antes de entrar en condiciones de flameo. Ello es debido al no acoplamiento de las frecuencias de oscilación, la función estabilizadora de la placa situada en el borde de fuga y al hecho de que el flujo tarda más en desprenderse. Además, el movimiento descrito por la estructura articulada se compone de cuatro grados de libertad a diferencia de los dos de la placa plana, haciéndolo más complejo y provocando que el periodo de flameo sea mayor.
- El estudio paramétrico del caso deja clara la influencia del alargamiento y de la posición del centro de gravedad. Así, cuanto más retrasado esté el centro de gravedad con respecto al borde de ataque menores velocidades de flujo será capaz de soportar la estructura antes de comenzar a flamear. Asimismo, para valores menores del alargamiento alar ocurre lo contrario, es decir, las velocidades de flameo serán mayores debido a que el flujo se desprende más tarde y la estructura es más estable. En ese sentido, cuanto menor es la longitud de la placa trasera el comportamiento se asemeja más al caso de una placa plana que resistía en menor medida la entrada en flameo.

6.2. Trabajos futuros

En esta sección, como su propio nombre indica se van a plantear una serie de proyectos que se podrían realizar en base a la investigación experimental expuesta.

Estudio analítico del caso

El primero de los proyectos derivados de éste tiene que ver con el tratamiento analítico del caso. De hecho, en un primer instante, una de las ideas que surgió fue la de realizar un estudio experimental y contrastar resultados mediante el desarrollo teórico del mismo.

La razón de que no si hiciera vino del mayor interés por comparar el comportamiento de la estructura articulada con el de la placa plana. Además, como se ha comentado en alguna de las secciones del proyecto, modelar teóricamente el caso no resultaba evidente debido a que los movimientos descritos por la estructura articulada eran un tanto ambiguos a pesar de que se identificaron cuatro grados de libertad principales. En ese sentido, los conocimientos adquiridos durante la asignatura de *Aeroelasticidad* no acababan de ser suficientes para ejemplificar este tipo de comportamiento, donde se vio la caracterización de perfiles con flap que presentaban

hasta 3 grados de libertad pero correctamente definidos, lo cual no era el caso.

No obstante, con la utilización de todo el material disponible y el recibimiento de una labor de apoyo para poder tratar correctamente el caso de forma teórica, sí que se podría llevar a cabo esta labor, lo cual siempre resulta interesante.

Así, con el empleo de métodos ya conocidos para el tratamiento de las ecuaciones como el método energético de Lagrange y métodos para la obtención del punto de flameo como el método k (*método americano*) o el método pk (*método británico*) se podría desarrollar el estudio teórico del caso.

En resumen, el hecho de contrastar teóricamente los resultados obtenidos experimentalmente siempre es una buena de reafirmar que el estudio se ha desarrollado correctamente consiguiendo así la validación del modelo utilizado.

Utilización de perfiles alares reales y estudio en CFD

Ya se justificó el por qué se eligió este tipo de estructura para llevar a cabo el estudio en cuestión. Realmente, como se vio en la asignatura de *Aeroelasticidad* y se ha comentado, las alas de las aeronaves se caracterizan por tener una envergadura mucho mayor que el espesor, por lo que, según la teoría aplicada a estos casos, todos los puntos de un perfil pertenecientes a una sección del ala pueden considerarse como parte de la misma línea. Ahí es donde entraba en juego la placa plana, como forma de modelar una superficie de sustentación.

Ahora bien, se podría también trabajar con perfiles alares reales, modelados con un software de diseño y algún tipo de herramienta como la impresora 3D. Así, se llevarían a cabo los mismos experimentos planteando la misma disposición de los elementos para ver hasta que punto esa hipótesis es válida.

Además, se podría trabajar con diferentes perfiles alares como los simétricos o los supercríticos para ver la influencia de cada uno en la entrada en condiciones de flameo. Así, a partir de los resultados obtenidos para cada uno de ellos, sería buena idea intentar clasificarlos según la finalidad para la cual han sido diseñados en cuanto a criterios de entrada en flameo se refiere y viendo en qué tipos de aviones suelen utilizarse (militares, comerciales, de recreo, etc.)

De esta forma, también podría hacerse un análisis de perfiles alares según la época en la que fueron surgiendo, para contrastar si los más modernos presentan un mejor comportamiento ante el incremento del flujo incidente y son más estables ante este fenómeno. Claro está, que toda esta labor se vería acompañada de un gran trabajo documentativo.

Por otro lado, todo ese trabajo también podría verse apoyado con el estudio CFD mediante el software ANSYS de algunos perfiles para así poder obtener contornos de presión o de Mach sobre los perfiles, ver el comportamiento del flujo a lo largo de la estructura y contrastar las condiciones de flameo para ir un poco más allá en las explicaciones que se aporten.

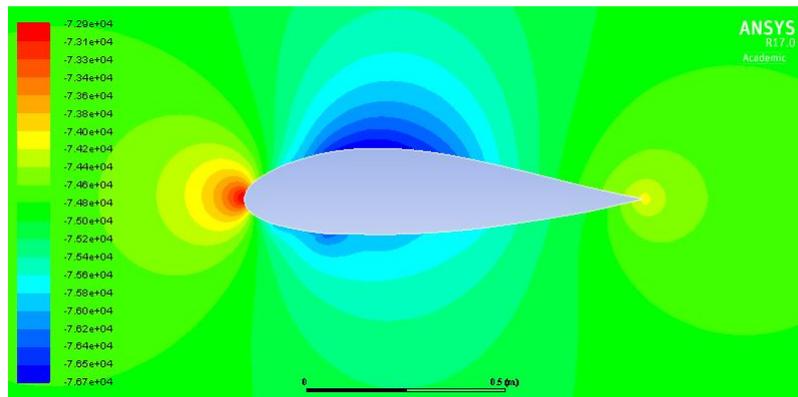


Figura 6.1: Contornos de presión en un perfil alar con estudio CFD

Estudio experimental de alas con y sin winglet

Como variación a este trabajo, en cuanto a la comparación del caso de una placa plana con la estructura articulada para ver el efecto de la placa situada en el borde de fuga, también se puede plantear otro caso.

Así, se podría llevar a cabo un estudio experimental del mismo tipo en el túnel de viento con superficies de sustentación que no abarcaran todo el ancho de la zona de medida del propio túnel. El motivo de ello reside en que si se pretende ver la función de un winglet, se han de mantener los efectos de los torbellinos de punta de ala, ya que una de las funciones principales de estos elementos es la de paliar dichos efectos.

De esta manera, probando configuraciones con y sin winglet se podría determinar si el winglet ejerce alguna función en la entrada en condiciones de flameo y ver hasta qué punto afecta su implementación.

Además, podría también compararse con el estudio realizado para ver que componente ejerce más influencia en la aparición del flameo, si el winglet o esa segunda placa que hace la función de flap. Desde luego, el estudio debería ser muy riguroso para que las condiciones de medida sean las mismas para todos los casos y no se extraigan conclusiones erróneas.



Figura 6.2: Winglet del ala de un Airbus A350 XWB

Implantación de prácticas experimentales en la asignatura de *Aeroelasticidad*

Como se comentó en la sección de **Motivación** del primer capítulo de este proyecto, una de las razones por las cuales se decidió realizar este trabajo experimental era el hecho de que la asignatura de *Aeroelasticidad* se limitaba un poco al tratamiento teórico del contenido, dejando un poco de lado la parte experimental.

En ese sentido, resultaría interesante adaptar este trabajo a la realización de una serie de prácticas de laboratorio en dicha asignatura, ya que este tipo de actividades siempre resulta ventajosa para el alumno ya que le permite gozar de una percepción visual del proceso y ver el comportamiento de las estructuras ante este tipo de fenómenos.

De esta manera, una vez conocido como se ha de montar la estructura, los materiales necesarios y su disposición en el túnel de viento, la adaptación a prácticas de laboratorio sería más fácil de llevar cabo ya que esa labora ya estaría realizada. Por ello, se podría estructura en tres prácticas agrupadas en un mismo bloque por ejemplo.

En la primera se podría realizar el estudio de la placa plana, con su toma de medidas correspondiente y la grabación de los vídeos a cámara lenta para el análisis del ciclo oscilatorio. En la siguiente, se podría llevar a cabo lo mismo pero para el caso de la estructura articulada. Finalmente, la tercera abarcaría la tarea de comparación de las dos anteriores manteniendo así la relación entre ellas. También se podría enfocar de otra manera y dedicar una sesión el tratamiento de uno de los casos y otra al estudio paramétrico, por ejemplo.

El problema vendría del tiempo necesario para la realización de los ensayos, ya que los diferentes grupos de trabajo no podría emplear el túnel de viento al mismo tiempo. Sin embargo y como en otras asignaturas, el proceso se podría optimizar planteando algún trabajo relacionado para hacer mientras se realizara la toma de medidas y creando turnos para que el túnel de viento no estuviera parado.

Bibliografía

- [1] *Apuntes de Aeroelasticidad*. Mario Lázaro Navarro. Grado en Ingeniería Aeroespacial, UPV, 2009.
- [2] *Notes of the course, Aerodynamics II*. Luis Miguel García-Cuevas González, Pedro Martí Gómez-Aldaraví. Grado en Ingeniería Aeroespacial, UPV, 2016.
- [3] *Apuntes Cálculo de aviones*. Andrés Omar Tiseira Izaguirre. Grado en Ingeniería Aeroespacial, UPV, 2013.
- [4] *Introduction to Aircraft Aeroelasticity and Loads*. Jan R. Wright, Jonathan E. Cooper. SPI Publisher Services, 2015.
- [5] *Principles of Aeroelasticity*. Raymond L. Bisplinghoff, Holt Ashley. Dover Publications, 2002.
- [6] *An Introduction to the Theory of Aeroelasticity*. Y. C. Fung. Dover Publications, 2002.
- [7] *Estudio de una placa plana sometida a flameo*. Jordi García Martínez. UPV, 2017.
- [8] *Estudio teórico y experimental de una placa y un perfil sometidos al fenómeno de flameo*. María del Carmen García Aguilar. UPV, 2016.
- [9] *Manual del Túnel de Viento*. CMT, Motores Térmicos, 2010.