

FORMAS DE RETRASAR LA ENTRADA EN PÉRDIDA EN LAS ALAS DE LAS AVES

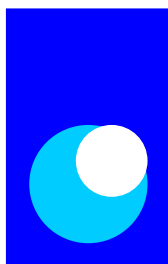
J. Meseguer¹, J.C. Álvarez¹ & A. Pérez²

¹ IDR/UPM. E.T.S.I. Aeronáuticos.
Universidad Politécnica de Madrid, E-28040 Madrid.

² SEO-Sierra de Guadarrama. El Escorial, Madrid.

Madrid, Marzo de 2004

Ref.: IDR/PA 0104



IDR/UPM, Universidad Politécnica de Madrid
E.T.S.I. Aeronáuticos, Ciudad Universitaria, 28040 Madrid
Tel.: 91- 336 6353, Fax: 91- 336 6363
E-mail: idr@idr.upm.es, Pag. web: www.idr.upm.es

INTRODUCCIÓN

Las alas de las aves son dispositivos de sustentación ciertamente complejos que deben satisfacer un alto número de requisitos, tanto estructurales como aerodinámicos. El ala ha de proporcionar las fuerzas aerodinámicas que permitan el vuelo del ave: la sustentación que equilibre al peso del animal y la tracción que compense la resistencia aerodinámica. Estas fuerzas aerodinámicas las consigue el ave por el movimiento de batimiento de las alas en el vuelo de aleteo, lo que genera tracción, o siguiendo una trayectoria descendente en el vuelo de planeo, de modo que la componente del peso en la dirección del movimiento compensa a la resistencia aerodinámica. En cualquier caso, aunque el razonamiento es más fácilmente comprensible en el caso del vuelo de planeo, la ecuación básica que gobierna el equilibrio vertical de fuerzas establece que, en primera aproximación, el peso del ave ha de ser igual a la sustentación:

$$Mg = L = \frac{1}{2} \rho U_{\infty}^2 S_b c_L, \quad (1)$$

donde M es la masa del ave, g la aceleración de la gravedad terrestre, L la sustentación, que es igual al producto de la presión dinámica ($\rho U_{\infty}^2 / 2$) por el área en planta de la superficie sustentadora S_b y por el coeficiente de sustentación c_L (ρ es la densidad del aire y U_{∞} la velocidad de avance del ave). Como es sabido el coeficiente de sustentación c_L es, dentro de un cierto rango de valores del ángulo de ataque α , proporcional a dicho ángulo: $c_L = (\partial c_L / \partial \alpha) \alpha$, siendo la pendiente de la curva de sustentación del ala (la constante de proporcionalidad $\partial c_L / \partial \alpha$) función básicamente del alargamiento del ala ($\Lambda = L_b^2 / S_b$, donde L_b es la envergadura) y de las características aerodinámicas de los perfiles que la conforman. Según esto, en vuelo de planeo, será:

$$L = \frac{1}{2} \rho U_{\infty}^2 S_b \frac{\partial c_L}{\partial \alpha} \alpha, \quad (2)$$

de donde se deduce que como en de un amplio rango de condiciones ρ , S_b y $\partial c_L / \partial \alpha$ son constantes, la única forma de satisfacer esta ecuación de equilibrio cuando disminuye la velocidad de vuelo es aumentando el ángulo de ataque, de forma que el producto $U_{\infty}^2 \alpha$ permanezca aproximadamente constante. Desafortunadamente esta condición está limitada por la entrada en pérdida de los perfiles del ala.

En efecto, Si el ángulo de ataque α es grande (como debería ocurrir si la velocidad de vuelo U_{∞} fuera pequeña), las condiciones adversas existentes en el extradós de los perfiles se agudizan, y en consecuencia la capa límite no es capaz de vencer los gradientes adversos de presión que aparecen en el extradós de los perfiles (tras el pico de succión característico del borde de ataque), produciéndose el desprendimiento de la capa límite, fenómeno conocido como entrada en pérdida (Meseguer *et al.*, 2001, cap. 1). Para ángulos de ataque grandes, el coeficiente de sustentación de los perfiles, c_l (y por tanto el del ala), deja de crecer linealmente con el ángulo de ataque, la pendiente de la curva de sustentación se hace menor y, de seguir aumentando el valor del ángulo de ataque, llega un momento en que la sustentación disminuye en vez de seguir creciendo (Fig. 1).

La entrada en pérdida de un perfil de ala es un fenómeno gobernado por la viscosidad, en el que juegan un papel dominante el número de Reynolds y la geometría del perfil. El número de Reynolds, $Re = c U_{\infty} / \nu$, donde c es una longitud característica (por ejemplo la cuerda del

perfil) y ν la viscosidad cinemática del aire, mide la importancia de los efectos inerciales frente a los viscosos en el flujo alrededor del perfil; su valor suele ser grande (por encima de 10^4 en el vuelo a baja velocidad de un ave de tamaño medio), lo que indica que los efectos viscosos son despreciables excepto en la capa límite. La importancia del número de Reynolds es que su valor determina que la capa límite sea laminar o turbulenta (Schlichting, 1960; Katz & Plotkin, 2001), y el carácter del flujo en la capa límite influye notablemente en el fenómeno del desprendimiento (una capa límite turbulenta es menos sensible a los gradientes adversos de presión).

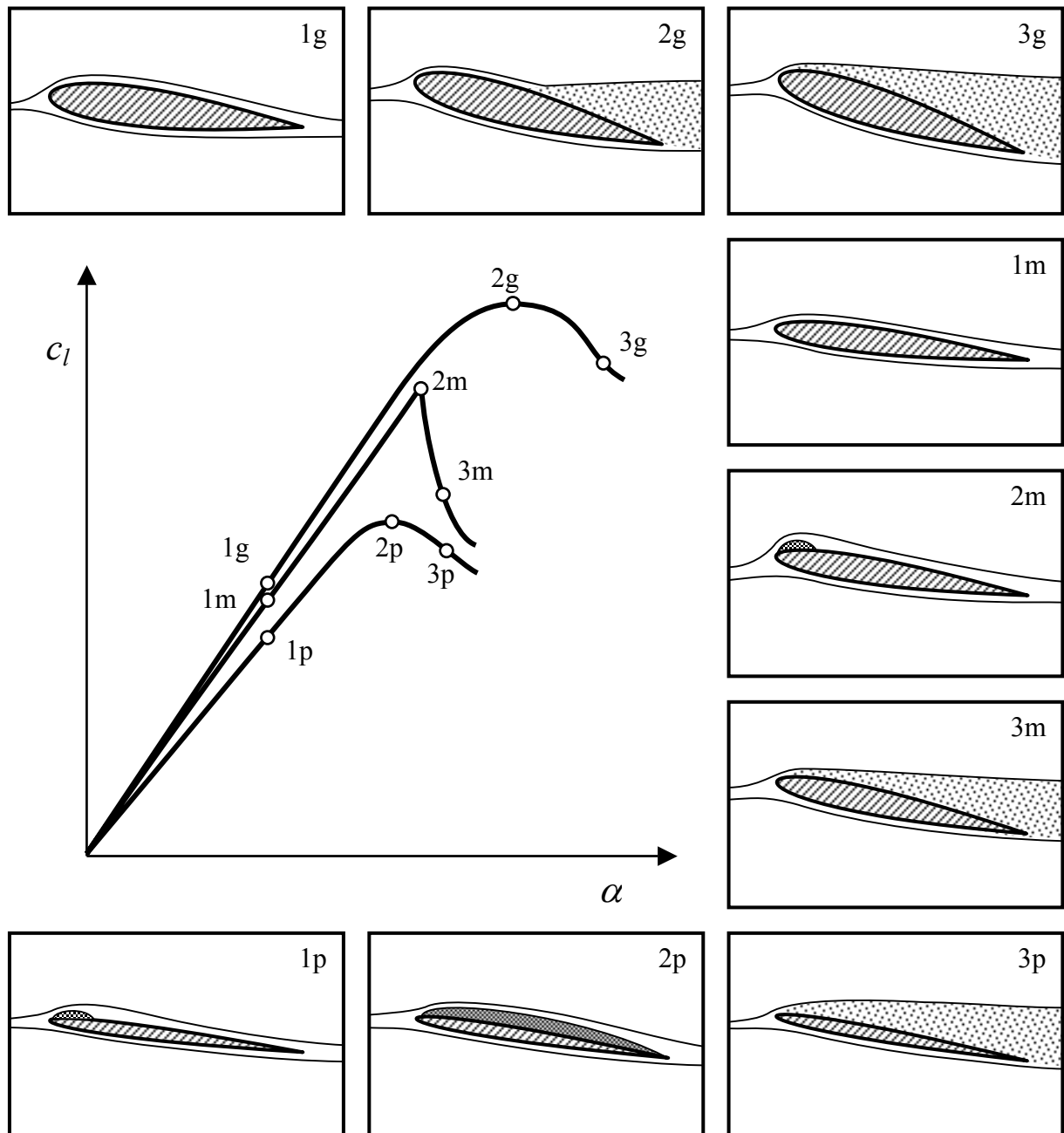


Fig. 1.–Variación con el ángulo de ataque, α , del coeficiente de sustentación, c_l , de perfiles gruesos (g), medios (m) y delgados (d). Los números en las curvas identifican las configuraciones fluidas representadas en los diversos esquemas.

La influencia de la geometría del perfil, caracterizada por los efectos de espesor y curvatura, se puede estudiar analizando la influencia en la entrada en pérdida del radio de curvatura de la línea de acuerdo entre extradós e intradós en el borde de ataque. La corriente ha de sobrepasar el borde de ataque, y es sabido que el pico de succión asociado al rebordeo (y por tanto el gradiente adverso de presión posterior) es tanto más acusado cuanto menor es dicho radio (Meseguer *et al.*, 2001). Como el radio de curvatura del borde de ataque está directamente relacionado con la distribución de espesor, una posible forma de catalogar la forma de entrada de los perfiles es atendiendo a su espesor relativo $\tau = t/c$ (el cociente entre el espesor máximo t y la cuerda del perfil c), y así se suele hablar de entrada en pérdida de perfiles gruesos, de perfiles medios y de perfiles delgados (McGullough & Gault, 1951; Palme, 1953; Torenbeek, 1976).

Los perfiles gruesos ($\tau > 0,14$) suelen entrar en pérdida de forma gradual (Fig. 1). Al aumentar el ángulo de ataque, la capa límite del extradós del perfil se va debilitando debido a los gradientes adversos de presión, cada vez mayores, y debido al rozamiento con la superficie del perfil; el desprendimiento se inicia por el borde de salida del perfil y la zona desprendida va aumentando progresivamente, desplazándose el punto de desprendimiento hacia el borde de ataque conforme el ángulo de ataque crece. La pérdida de sustentación comienza a ser significativa cuando la porción de capa límite desprendida supera la mitad de la cuerda del perfil (que es cuando se alcanza el máximo valor del coeficiente de sustentación). Los perfiles gruesos son bastante tolerantes a la pérdida, admitiendo ángulos de ataque bastante grandes (del orden de 15° o más) antes de que la sustentación comience a disminuir significativamente.

Los perfiles de espesor medio ($0,07 \leq \tau \leq 0,14$) suelen entrar en pérdida súbitamente (Fig. 1); esto se explica teniendo en cuenta que en estos perfiles, a un cierto ángulo de ataque, todavía pequeño, la capa límite (laminar) se desprende muy cerca del borde de ataque, volviéndose a adherir casi inmediatamente. De este modo se forma una burbuja de recirculación en el extradós, en las proximidades del borde de ataque. Según aumenta el ángulo de ataque esta burbuja se desplaza hacia el borde de ataque, hacia una zona del extradós de mayor curvatura, lo que dificulta que la capa límite se readhiera. Sobrepasado un cierto valor crítico del ángulo de ataque (10° ó 12° podrían ser valores típicos) la readhesión de la capa límite no se produce, la burbuja de recirculación explota y la caída de sustentación se produce bruscamente.

La entrada en pérdida de los perfiles delgados ($\tau \leq 0,07$) se caracteriza porque a ángulos de ataque pequeños se desarrolla una burbuja de recirculación en el extradós, causada por el desprendimiento (también próximo al borde de ataque) y la posterior readhesión de la capa límite. Esta burbuja va aumentando de tamaño conforme aumenta el valor del ángulo de ataque, desplazándose el punto de readhesión hacia el borde de salida, de modo que cuando el ángulo de ataque es tal que el punto de cierre de la burbuja alcanza el borde de salida la readhesión ya no es posible y se produce una disminución de la sustentación (Fig. 1).

Estos mecanismos de entrada en pérdida explican el comportamiento estrictamente bidimensional de los perfiles. El caso tridimensional, como es un ala real, es aún más complejo, pues en una misma ala, además de posibles efectos de barrido lateral de capa límite, coexisten distintos tipos de perfiles, lo que dificulta las explicaciones basadas en tipos puros de entrada en pérdida como los descritos.

A la vista de lo dicho, como las características geométricas de los perfiles que conforman las alas (espesor y curvatura) cambian a lo largo de la envergadura, y dado que la entrada en pérdida de los perfiles depende de estos parámetros (básicamente del espesor), es de esperar que el comportamiento de las alas de las aves en la situación de pérdida sea diferente de una zona a otras según varíe el espesor y, en menor medida, la curvatura. Si esto es así, como la forma de entrada en pérdida de los perfiles cambia con el espesor relativo, es de esperar también que los dispositivos hipersustentadores existentes en las distintas partes de las alas de las aves, usados para retrasar o limitar en lo posible la entrada en pérdida, sean diferentes según la zona en consideración, como así ocurre.

Estas razones justifican que para explicar el fenómeno de la entrada en pérdida de las aves (aunque sólo sea en el caso del vuelo estacionario), sea de interés conocer la distribución de espesor a lo largo de la envergadura de las alas. En los apartados siguientes se presentan los resultados de diversas series de medidas de las distribuciones de espesor en alas de distintos ejemplares de paloma (*Columba livia*) y de pardela balear (*Puffinus mauretanicus*), y se analiza la relación de las distribuciones de espesor medidas con los diferentes mecanismos de hipersustentación existentes en las alas. También se presentan resultados experimentales, obtenidos de los ensayos en túnel aerodinámico de un modelo de perfil de ala, que aclaran al papel que juegan las plumas cobertoras como dispositivo hipersustentador.

DISTRIBUCIONES DE ESPESOR RELATIVO

Para caracterizar aerodinámicamente las alas se han medido las distribuciones de espesor a lo largo de las envergaduras y las formas en planta de alas de paloma (*Columba livia*) y alas de pardela balear (*Puffinus mauretanicus*).

En la tabla 1 se resumen los datos biométricos medidos en los dos tipos de aves consideradas (los detalles del método biométrico general han sido ya publicados, véase Álvarez *et al.*, 1998; Álvarez *et al.*, 2001). Los parámetros geométricos medidos (además de los espesores) han sido:

- La masa del ave, M .
- La longitud del ala extendida, L_w .
- La cuerda máxima del ala, c_w .
- La longitud del álula, L_a .
- La distancia entre la raíz del álula y la punta del ala, L_c .
- La envergadura del ave, L_b .
- El área de la forma en planta del ala, S_w .
- El área de la superficie sustentadora, definida como $S_b = 2S_w + (L_b - 2L_w)c_w$.

Para la medida de los espesores relativos, en el caso de las palomas se han utilizado dos ejemplares de aves, midiéndose el espesor máximo t (Fig. 2) en diversas secciones del ala equidistantes entre sí (la distancia entre cada dos secciones de medida adyacentes es de 2 cm). Las cuerdas, c , de las secciones consideradas se obtienen del dibujo de la forma en planta del ala (Álvarez *et al.*, 2001).

Tabla 1. Valor medio, \bar{v} , y desviación típica, σ , de los parámetros medidos en las alas de varios especímenes de paloma (*Columba livia*, cinco ejemplares) y de pardela balear (*Puffinus mauretanicus*, diez ejemplares). Los datos biométricos relativos a la *Columba livia* son de Álvarez *et al.* (2001).

	<i>Columba livia</i>		<i>Puffinus mauretanicus</i>	
	\bar{v}	σ	\bar{v}	σ
Masa del ave, M [kg]]	0,26	0,07	0,57	0,04
Longitud del ala extendida, L_w [m]	0,30	0,01	0,39	0,01
Cuerda máxima del ala, c_w [m]	0,11	0,00	0,09	0,00
Longitud del álula, L_a [m]	0,05	0,00	0,04	0,00
Distancia desde la raíz del álula a la punta del ala, L_c [m]	0,22	0,01	0,25	0,01
Envergadura del ave, L_b [m]	0,65	0,00	0,84	0,01
Área de la forma en planta del ala, S_w [m ²]	0,026	0,003	0,028	0,001
Área de la superficie sustentadora, S_b [m ²]	0,059	0,007	0,062	0,003
Carga alar, $W_l = Mg/S_b$ [Pa]	43,3	5,4	82,2	6,1
Alargamiento, $\Lambda = L_b^2 / S_b$	7,14	0,34	11,45	0,33
Posición adimensional del álula, L_c/L_w	0,745	0,024	0,646	0,090
Longitud adimensional del álula, $2L_a/L_b$	0,163	0,016	0,090	0,004

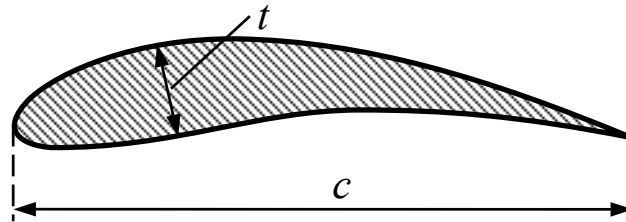


Fig. 2.– Espesor máximo, t , y cuerda, c , una sección del ala.

Los resultados obtenidos se muestran en la Fig. 3, donde se ha representado el espesor relativo, $\tau = t/c$, en función de la distancia adimensional $\xi = x/L_w$, donde x es la distancia medida desde la raíz del ala y L_w la longitud total del ala extendida. En el mismo gráfico se han representado también resultados obtenidos a partir de los datos publicado por Vest & Katz (1996). Los resultados presentados en la Fig. 3 indican que, obviamente, el espesor relativo disminuye con la distancia a la raíz, tendiendo a cero en la punta del ala. En el caso del ala de las palomas el espesor relativo decrece con la distancia de forma aproximadamente lineal hasta que se alcanza la zona del álula ($\xi \approx 0,3$), donde el espesor deja de disminuir o incluso crece. Sobrepasada el álula el espesor relativo decrece de nuevo hasta anularse en la punta.

Es conveniente resaltar que cerca de la raíz, y hasta mitad de distancia entre la raíz y el álula, los perfiles del ala se pueden considerar como gruesos (según la clasificación presentada anteriormente), que en la zona del álula los perfiles son de espesor medio, y que entre el álula y el extremo del ala se tienen perfiles delgados.

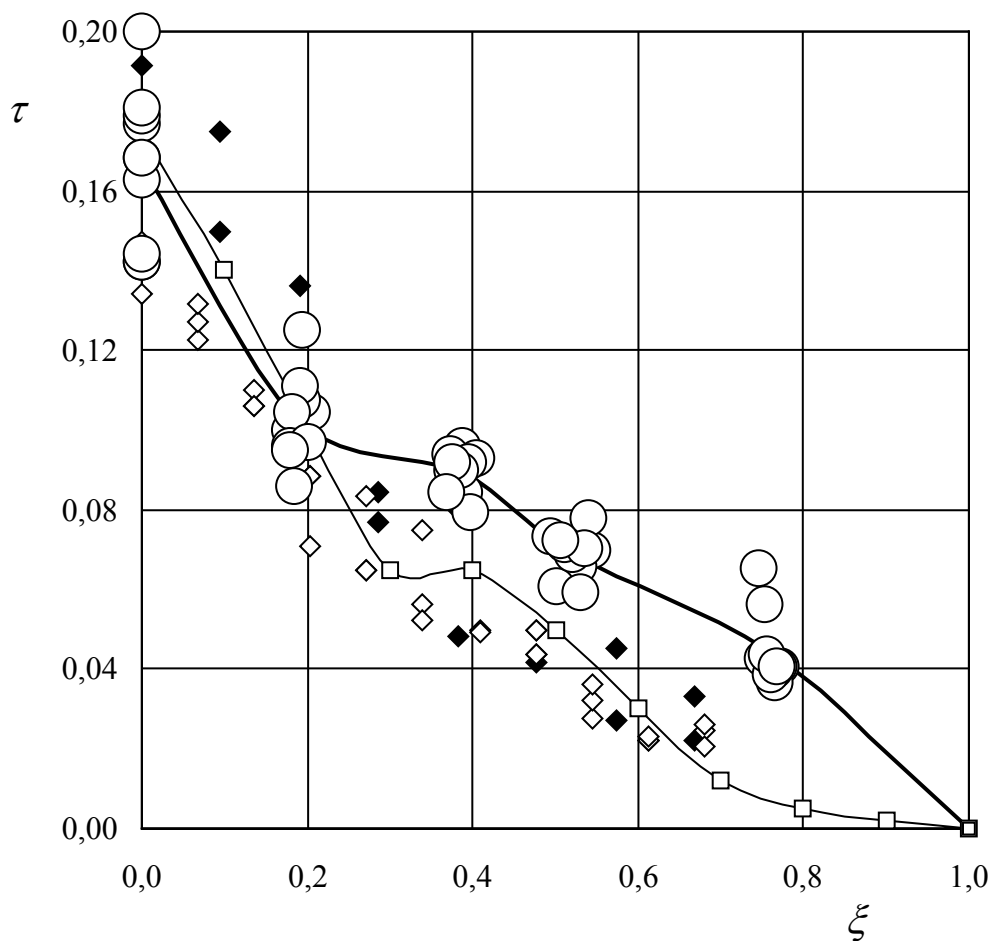


Fig. 3.– Variación con la distancia adimensional, $\xi = x/L_w$, del espesor relativo, $\tau = t/c$, de los perfiles que conforman las alas de distintas aves. Los rombos negros indican medidas de una misma ala de paloma (*Columba livia*) realizadas por dos operadores distintos y los rombos blancos medidas de otra ala de paloma realizadas por tres operadores diferentes. Los cuadrados representan resultados obtenidos a partir de los datos publicados por Vest & Katz (1996), y los círculos blancos las mediciones efectuadas en las alas de diez ejemplares de pardela balear (*Puffinus mauretanicus*).

Las medidas relativas a las palomas se han hecho en el entorno controlado de un laboratorio, en condiciones muy diferentes de comodidad y disponibilidad de las que se pueden encontrar en una campaña de medición al aire libre. Por esta razón se ha definido un procedimiento biométrico en el que se establecen claramente los puntos de inspección y la forma de medir. El procedimiento es en parte coincidente con el recomendado para obtener la superficie alar (Pennycuik, 1989). Como puntos de inspección significativos se han elegido las zonas de articulaciones de huesos, salvo el punto más próximo a la punta del ala, situado en las plumas primarias (Fig. 4). La razón de esta elección es que así las medidas se realizan sobre partes del ala que presentan una cierta rigidez. Así pues, de acuerdo con el procedimiento, los puntos de inspección son:

- P1: Hombro; inserción del ala con el tórax,
- P2: Codo, articulación del húmero con radio y ulna,

- P3: Articulación carpal,
- P4: Extremo digital,
- P5: Plumás primarias, en una posición intermedia entre el punto P4 y el extremo de las plumas primarias (borde marginal).

Las magnitudes medidas en cada una de las secciones son, como se ha dicho, el espesor máximo, t , que se mide en el borde de ataque del ala, procurando no comprimir las plumas y los tejidos, la distancia, x , desde la axila del ave hasta la sección en cuestión, y la anchura total del ala en la sección de medida, o cuerda c , midiéndose estas dos últimas magnitudes sobre el contorno del ala.

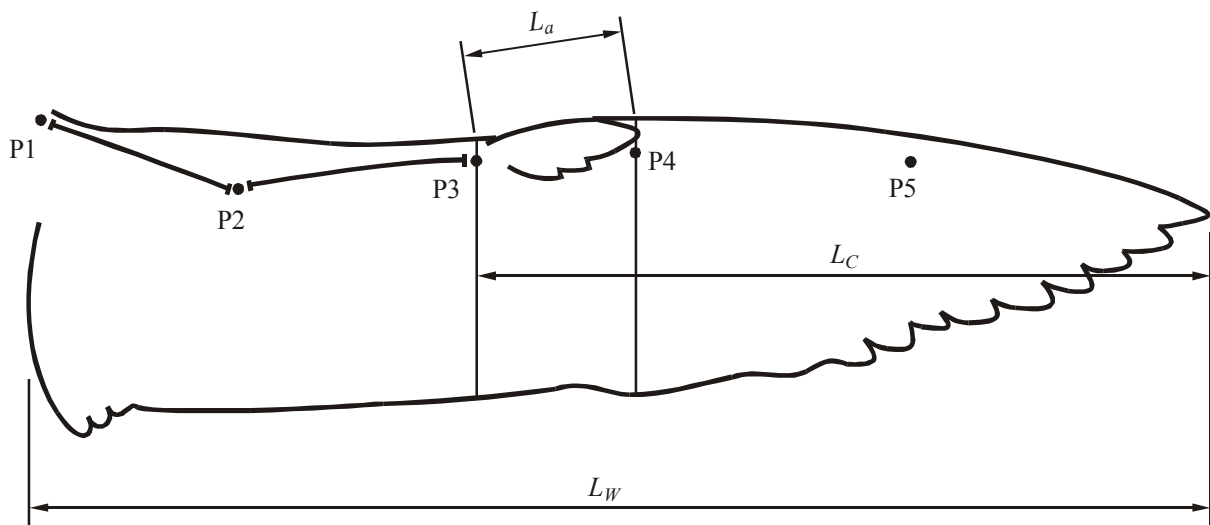


Fig. 4.– Forma en planta de ala de *Puffinus mauretanicus*, con indicación de las secciones donde se ha medido el espesor del ala (etiquetadas con P1, P2, P3, P4 Y P5) y de algunas de las longitudes características que definen la geometría del ala.

También, obedeciendo a factores anatómicos y estructurales, para el análisis del fenómeno de la entrada en pérdida, se ha considerado conveniente dividir el ala en tres regiones básicas: la interior, próxima a la raíz del ala, está comprendida entre los puntos P1 y P3, e incluye toda la zona del brazo y antebrazo (húmero, radio-ulna). En esta zona la principal superficie alar está proporcionada por las plumas secundarias, y la forma del borde de ataque está condicionada por la presencia del tendón que une la articulación carpal con su músculo correspondiente en el hombro (*tensor patagii*).

Se ha diferenciado también una zona intermedia, entre P3 y P4, formada por el conjunto de las articulaciones carpales y todos los huesos de la mano y dedos; en esta zona está situada y ejerce su influencia el álula. La zona intermedia está provista de un cierto movimiento de rotación, por lo que puede cambiar el plano de la superficie de las primarias (región distal) con respecto al resto del ala.

Entre el punto P4 y la punta del ala discurre la zona distal, formada por las plumas primarias, desde su inserción en los huesos de los dígitos hasta su extremo más alejado del ala (borde marginal). Esta parte del ala está básicamente formada por las plumas primarias sobrepuestas unas sobre otras, de forma que impidan el paso del aire de intradós a extradós, salvo por las

ranuras que algunas especies presentan en los extremos de las alas en determinadas circunstancias.

Siguiendo el método expuesto en Álvarez *et al.* (2001) sobre la biometría general, y el presentado en los párrafos anteriores respecto a la medida de la distribución de espesor, se han medido las alas de diez especímenes de pardela balear (*Puffinus mauretanicus*). Hay que decir que los datos han sido tomados únicamente sobre alas derechas (comprobando que no estuviesen dañadas) y solamente en animales con plena capacidad de vuelo. En la campaña de medida han sido desestimados todos los individuos que no eran adultos o que presentaban signos de muda. El sexo de los especímenes no ha sido tenido en cuenta, ya que las diferencias entre ambos sexos no parecen ser significativas (Mayaud, 1932; Cramp & Simmons, 1977; C.M.A.G.B., 1997). Los resultados obtenidos se muestran en la Fig. 3.

MECANISMOS HIPERSUSTENTADORES

En las alas de las aves es posible identificar distintos sistemas de control de capa límite cuya finalidad es retrasar la entrada en pérdida cuando aumenta mucho el ángulo de ataque, permitiendo en consecuencia que el valor del coeficiente de sustentación siga creciendo con el ángulo de ataque, por encima del valor máximo que se alcanzaría de no existir tales dispositivos de hipersustentación.

Los sistemas de control de la entrada en pérdida presentes en las alas de las aves identificados por diversos autores son los siguientes:

Las plumas cobertoras, que están situadas sobre las plumas secundarias y actúan de forma pasiva, despegándose del extradós del ala debido a las fuerzas de succión cuando el ángulo de ataque alcanza un cierto valor (von Holst & Kücheman, 1942; Shyy *et al.*, 1999). Su función parece ser frenar el avance de la zona de corriente desprendida al fijar la posición del punto de desprendimiento de la capa límite, punto que en los perfiles gruesos, cuando se produce la entrada en pérdida, recorre el extradós del perfil, desde el borde de salida hacia el borde de ataque, según aumenta el valor del ángulo de ataque.

Otro dispositivo hipersustentador es el álula, que funciona como el dispositivo hipersustentador del mismo nombre empleado en las aeronaves (conocido en inglés como "slat"). Con el álula desplegada se controla el flujo de aire en el extradós del ala, suavizando los gradientes de presión adversos y retardando de forma muy efectiva el desprendimiento (von Holst & Kücheman, 1942; Storer, 1948; Savile, 1956; Foster, 1972; Álvarez *et al.*, 2001). El álula se despliega de forma involuntaria cuando las condiciones de presión en el extradós del ala, cerca del borde de ataque, alcanzan un cierto umbral (cuando el pico de succión es particularmente intenso, lo que ocurre al aumentar el ángulo de ataque, Álvarez *et al.*, 2001), aunque también se ha sugerido que su deflexión puede controlarse de forma voluntaria (Storer, 1948). En algunas especies la primera pluma primaria es significativamente más corta que el resto de sus homólogas, tal es el caso de las urracas (*Pica pica*), pudiendo cumplir una función similar a la del álula en zonas más distales que donde se ubica ésta.

El tercer mecanismo hipersustentador está asociado a las plumas primarias, pues la disposición de estas plumas en la zona más extrema del ala del ave (en el borde marginal)

permite la aparición de ranuras entre las mismas (Savile, 1956; von Holst & Kücheman, 1942). Se ha sugerido que estas ranuras tienen como finalidad permitir que parte del flujo de aire que corre por el intradós pase al extradós del ala, inyectando cantidad de movimiento en la capa límite del extradós y evitando por tanto su desprendimiento, como ocurre en las ranuras de borde de ataque y en las ranuras que comunican extradós e intradós existentes entre las superficies hipersustentadoras de borde de salida (flap Fowler) en las alas de las aeronaves (Smith 1975, Torenbeek 1976). Sin embargo esta disposición de las plumas en el borde marginal del ala es susceptible de otra explicación aerodinámica, ya que una configuración ranurada, al menos en el vuelo de planeo, disminuye la resistencia inducida asociada a la formación de la estela de torbellinos corriente abajo del ala, al suavizar la intensidad de los torbellinos marginales (Storer, 1948; McNeil-Alexander, 1983; Tucker, 1993).

En el caso de las alas de las aves parece existir una adaptación entre el espesor relativo de los perfiles y los dispositivos de hipersustentación empleados, que varían de unas partes del ala a otras. En efecto, de las medidas obtenidas (Fig. 3) se puede apreciar que los perfiles situados entre las secciones P1 y P3 son relativamente gruesos (tanto más cuanto más cerca de la raíz), lo que se justifica por razones estructurales. Esta región corresponde a la zona interior del ala, y es donde están las plumas cobertoras, que como se ha dicho, cuando están deflectadas frenan la entrada en pérdida de esta parte del ala, estableciendo barreras que dificultan el avance progresivo del punto de desprendimiento.

Los perfiles de espesores medios están en la zona intermedia, región protegida de la pérdida por el álula (aunque a partir del punto P2 se podría hablar ya de perfiles de espesor medio). Como es sabido el álula actúa fundamentalmente en la zona próxima al borde de ataque, generando un campo de velocidades que se opone al creado por el perfil principal. Esto disminuye levemente la velocidad máxima que aparece en el borde de ataque del perfil, suavizando el pico de succión y suavizando en consecuencia el gradiente adverso de presión existente corriente abajo del citado pico de succión (Álvarez *et al.*, 2001). Se entiende que el álula resulta más efectiva en perfiles que presentan picos de succión muy acusados cerca del borde de ataque del ala, tal es el caso de los perfiles con espesores medios y delgados, que en perfiles donde el pico de succión está más suavizado, como ocurre en los perfiles gruesos.

Los perfiles más delgados, los de menor espesor, están dispuestos en la zona distal, cubriendo la parte del ala formada exclusivamente por las plumas primarias. Esta zona no parece estar equipada con mecanismos específicos de hipersustentación, salvo la posibilidad de que se inyecten chorros tangenciales a través de las ranuras existentes entre las plumas. Conviene resaltar que la mayor parte de la sustentación generada por el ave está concentrada en las partes interna e intermedia, habiéndose sugerido que la función principal de la parte distal es la generación de tracción durante el vuelo de aleteo (Ward-Smith, 1984). Ya se ha mencionado también el papel del borde marginal del ala en la resistencia inducida en el vuelo de planeo.

Para aclarar más el efecto de las plumas cobertoras sobre la entrada en pérdida de los perfiles del ala próximos a la raíz, se han llevado a cabo mediciones sobre un perfil de espesor grueso-mediano en uno de los túneles aerodinámicos del Instituto Universitario "Ignacio Da Riva" de la Universidad Politécnica de Madrid (IDR/UPM). El perfil empleado ha sido un NACA 0012 con el borde de ataque ligeramente modificado (más afilado), es decir un perfil simétrico (sin curvatura), con un 12% de espesor relativo (Abbott & von Doenhoff, 1959). El

perfil, de 0,22 m de cuerda (la envergadura del perfil es de 0,15 m, y coincide con el ancho de la cámara de ensayos del túnel empleado, de forma que el ensayo es bidimensional), está equipado con treinta y tres tomas de presión, dieciséis en el extradós, otras tantas en el intradós y una más en el borde de ataque. Las tomas de presión están hechas de tubo de latón de 1 mm de diámetro interior, conectados mediante tubos flexibles de plástico al selector de tomas de presión, que está conectado a su vez al transductor de presión (Lucas P3061-2 WG). El túnel S1 es un túnel tipo Eiffel, soplado, tiene una longitud de 7 m y consta de ventilador centrífugo, cámara de tranquilización, contracción, cámara de ensayos y difusor. La cámara de ensayos es cerrada, de 1,2 m de longitud y una sección de 0,15 m de ancho y 0,9 m de alto. La cámara de ensayos está equipada con un tubo Pitot para la medida de las magnitudes fluidas de referencia (presión estática y presión de remanso), una plataforma giratoria donde se instalan los modelos a ensayar (situada en una de las paredes laterales de la cámara) y un desplazador de sondas controlado por ordenador (no empleado en estos ensayos).

En los ensayos se han considerado dos configuraciones de perfil: el perfil limpio, como se ha descrito anteriormente, y el mismo perfil provisto de un flap de extradós: una chapa delgada en el extradós que simula las plumas cobertoras una vez están desplegadas. La chapa tiene una longitud de 0,022 m (un 10% de la cuerda del perfil) y se han hecho distintos ensayos variando de unos a otros la distancia a lo largo de la cuerda del punto de sujeción de la chapa, que generalmente ha estado desplegada formando un ángulo de 30° respecto a la superficie del perfil. En la Fig. 5 se muestra la distribución a lo largo de la cuerda del coeficiente de presión medido sobre el perfil en dos configuraciones distintas (el flap de extradós está situado a $c/3$ del borde de salida).

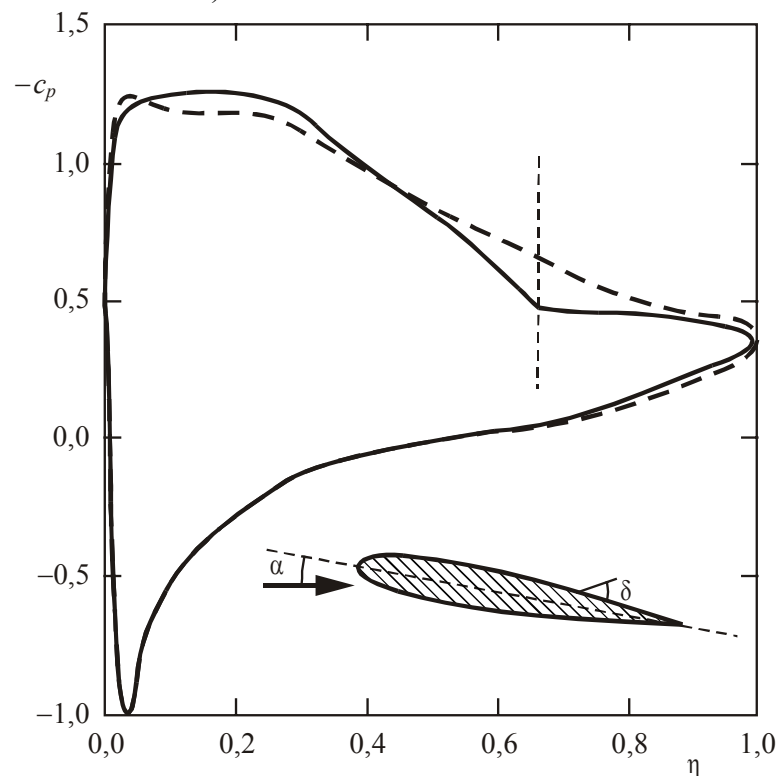


Fig. 5.— Variación con la distancia adimensional, $\eta = y/c$, del coeficiente de presión, c_p , medido sobre un perfil simétrico, con un espesor relativo de 12%, dotado con un flap de extradós, sometido a una corriente incidente con ángulo de ataque $\alpha = 15^\circ$, en dos situaciones distintas del flap: sin deflejar ($\delta = 0^\circ$, línea continua) y deflejado ($\delta = 30^\circ$, línea de trazos).

El coeficiente de presión, c_p , se ha calculado a partir de las presiones medidas en la forma habitual, es decir: $c_p(\eta) = [p(\eta) - p_\infty]/(p_0 - p_\infty)$, donde $\eta = y/c$ es la variable adimensional que mide las distancias desde el borde de ataque del perfil, $p(\eta)$ es la presión en la toma situada a la distancia η , p_∞ es la presión estática y p_0 la presión de remanso (la diferencia entre ambas presiones es, por tanto, la presión dinámica, $p_0 - p_\infty = \rho U_\infty^2 / 2$). Las dos distribuciones representadas en la Fig. 5 corresponden a un ángulo de ataque razonablemente grande, $\alpha = 15^\circ$, para el que el perfil alcanza el máximo coeficiente de sustentación (aunque la capa límite está ya desprendida en una buena porción del extradós). Una de las distribuciones de coeficiente de presión corresponde al caso de flap sin deflectar y otra al flap deflectado (el ángulo de deflexión es $\delta = 30^\circ$). Se observa que el comportamiento de la capa límite es bastante distinto en las proximidades del flap, pues en un caso la capa límite en el extradós está desprendida desde aproximadamente la mitad de la cuerda, mientras que en otro está desprendida únicamente corriente abajo del flap, permaneciendo adherida en la parte delantera del perfil, por delante del flap. Así pues, parece que la chapa desplegada actúa efectivamente como un elemento fijador del punto de desprendimiento de la capa límite, lo que evita (para cierto intervalo de valores del ángulo de ataque) que el desprendimiento siga progresando a lo largo de la cuerda.

El efecto de la chapa deflectora en la evolución de la entrada en pérdida queda todavía más claramente de manifiesto en la Fig. 6, donde se muestra la variación con el ángulo de ataque del coeficiente de presión en la toma de presión situada inmediatamente corriente arriba de la charnela del flap, con éste sin desplegar ($\delta = 0^\circ$) y deflectado para un ángulo de ataque grande ($\delta = 30^\circ$, $\alpha = 15^\circ$). Obsérvese que sin flap, para ángulos de ataque pequeños el coeficiente de presión varía linealmente con el ángulo de ataque, como era de esperar de acuerdo con las predicciones teóricas (Abbott & von Doenhoff, 1959; Katz & Plotkin, 2001), pero en torno a 10° se produce un cambio de pendiente en la curva, y el coeficiente de presión se hace más negativo que lo que marca el comportamiento lineal. Este cambio de pendiente indica que la toma en consideración está en pérdida a partir de $\alpha \approx 10^\circ$. Nótese en cambio que cuando el flap de extradós está activado el coeficiente de presión se asemeja más al comportamiento lineal, y esto significa capa límite no desprendida (el valor de c_p no puede ser igual al de la predicción lineal pues la deflexión de la chapa altera el campo de presiones en su entorno).

En resumen, como se ha dicho anteriormente, el ala presenta un gradiente de espesor relativo a lo largo de la envergadura y unos dispositivos de hipersustentación adaptados en cada región del ala al tipo de entrada en pérdida. Aunque esta conclusión se basa en una simplificación extremadamente rigurosa de la compleja realidad de la entrada en pérdida de una superficie sustentadora deformable, como es el ala de un ave, los resultados obtenidos permiten explicar satisfactoriamente el comportamiento aerodinámico de las distintas partes del ala, y de los dispositivos hipersustentadores presentes en cada zona (plumas cobertoras y álula). En el caso de las plumas cobertoras se ha analizado experimentalmente su efectividad para fijar el punto de remanso, aunque en los experimentos sólo se ha barrido un estrecho entorno del espacio de valores de los parámetros implicados (geometría del perfil y del flap, posición de éste, ángulo de ataque y ángulo de deflexión), quedando para estudios posteriores un análisis más detallado de este fenómeno.

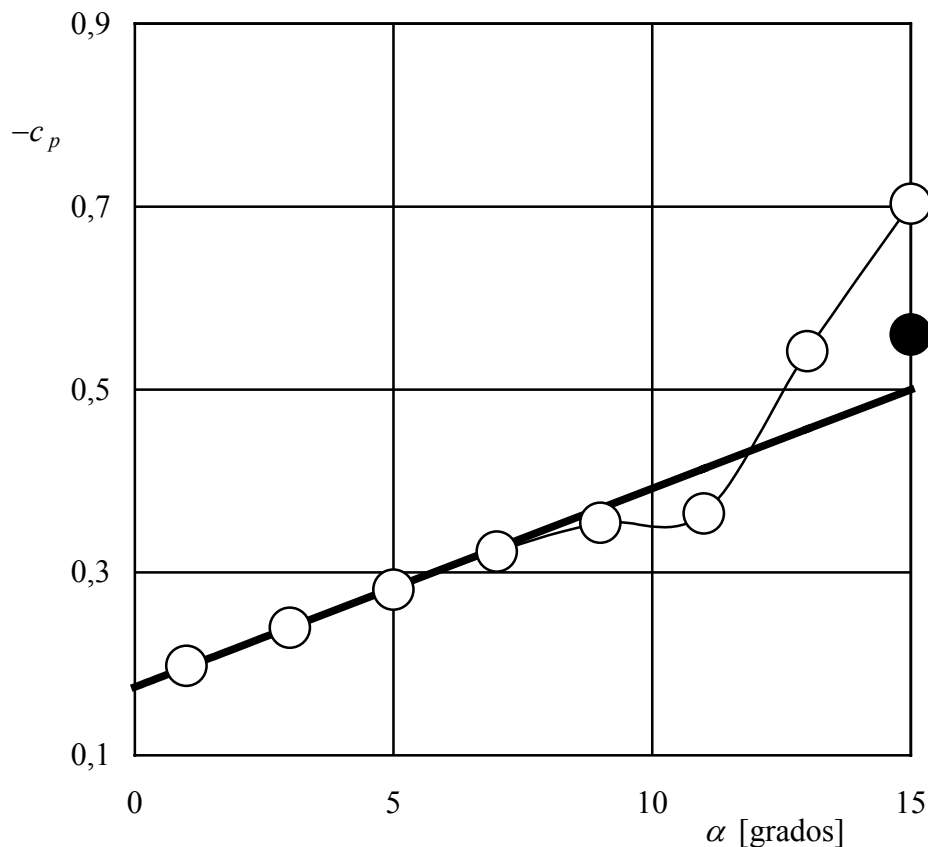


Fig. 6.— Variación con el ángulo de ataque, α , del coeficiente de presión, c_p , medido en la toma de presión situada corriente arriba del flap de extradós un perfil simétrico, con un espesor relativo de 12%. Los símbolos blancos indican resultados obtenidos con el flap sin deflechar, y el símbolo negro con el flap deflechado 30°.

AGRADECIMIENTOS.— Los autores desean expresar su agradecimiento a Miguel McMinn (G.O.B., Grup Balear d'Ornitologia i Defensa de la Naturalesa, Balears), GREFA (Grupo de Recuperación de la fauna Autóctona, Madrid), Greenpeace (Proyecto Greenpeace IV-Zorba, Balears) y Francisco José Cantos.

BIBLIOGRAFÍA

ABBOTT, I. & von DOENHOFF, A. E. 1959. *Theory of wing sections*. Dover Publications, Inc. New York.

ÁLVAREZ, J. C., PEREZ, A. & MESEGUER, J. 1998. Biometría de la pardela cenicienta (*Calonectris diomedea*) y del paño común (*Hydrobates pelagicus*) para el estudio de su aerodinámica y vuelo, *Anuari Ornitologic de les Balears 1997*, 12: 17-28.

ÁLVAREZ, J. C., MESEGUER, J., MESEGUER, E. & PEREZ, A. 2001. On the role of the alula in the steady flight of birds. *Ardeola*, 48: 161-173.

C.M.A.G.B., Conselleria de Medi Ambient, Govern Balear. 1997. Biología y conservación de la Pardela balear *Puffinus mauretanicus*. *Documents Tecnicos de Conservació*, 2: 7-9.

CRAMP, S. & SIMMONS, K. E. L. 1977. *The birds of the Western Palearctic*. Oxford University Press. Vol. 1: 149-150. Oxford.

FOSTER, D. N. 1972. Flow around wing sections with high-lift devices. *Journal of Aircraft*, 9: 205-210.

KATZ, J. & PLOTKIN, A. 2001. *Low speed aerodynamics*. Cambridge University Press. Cambridge.

MAYAUD, N. 1932. Considerations sur la morphologie et la systematique de quelques Puffins. *Alauda*, IV: 41-78.

McGULLOUGH, G. B. & GAULT, D. E. 1951. *Examples of three representative types of airfoil-section stall at low speed*. NACA TN 2502, National Advisory Committee for Aeronautics. Washington.

McNEIL-ALEXANDER, R. 1983. *Animal mechanics*. Blackwell Scientific Publications, Oxford.

MESEGUER, J., SANZ, A., PERALES, J. M. & PINDADO, S. 2001. *Aerodinámica civil. Cargas de viento en las edificaciones*. McGraw-Hill/Interamericana de España S.A.U. Aravaca, Madrid.

PALME, H. O. 1953. *Summary of stalling characteristics and maximum lift of wings at low speed*. SAAB TN 15, Svenska Aeroplan Akbtiebolaget. Linköping.

PENNYCUICK, C. 1989. *Bird flight performance. A practical calculation manual*. Oxford University Press. Oxford.

SAVILE, D.B.O. 1956. Adaptive evolution in the avian wing. *Evolution*, 11: 212-224.

SCHLICHTING, H. 1960. *Boundary layer theory*. McGraw-Hill. New York.

SHYY, W., BERG, M. & LJUNGQVIST, D. 1999. Flapping and flexible wings for biological and micro air vehicle. *Progress in Aerospace Sciences*, 35: 455-505.

SMITH, A. M. O. 1975. High-lift aerodynamics. *Journal of Aircraft*, 12: 501-531.

STORER, J.H. 1948. *The flight of birds*. Cranbrook Institute of Science, Bulletin No. 28. Cranbrook Press. Michigan.

TORENBEEK, E. 1976. *Synthesis of subsonic airplane design*. Delft University Press. Delft.

TUCKER, V.A. 1993. Gliding birds: reduction of induced drag by wing tip slots between the primary feathers. *Journal of Experimental Biology*, 180: 285-310.

VEST, M.S. & KATZ, J. 1996. Unsteady aerodynamic model of flapping wings, *AIAA Journal*. 34: 1435-1340.

von HOLST, E. & KÜCHEMAN, D. 1942. Biological and aerodynamical problems of animal flight. *Journal of the Royal Aeronautical Society*, 40: 39-56.

WARD-SMITH, J. A. 1984. *Biophysical aerodynamics and the natural environment*. John Wiley & Sons. Chichester.