

Influencia de la cola en el vuelo del ave primitiva *Archaeopteryx*

José Meseguer¹, José L. Sanz²,
Luis M. Chiappe³, Francisco Ortega⁴,
Ángel Sanz-Andrés¹, Isabel Pérez-Grande¹,
Sebastián Franchini¹

¹ Instituto Universitario "Ignacio Da Riva" (IDR/UPM), E.T.S. de Ingenieros Aeronáuticos, Universidad Politécnica de Madrid, 28040 Madrid, España.

² Unidad de Paleontología, Departamento de Biología, Facultad de Ciencias, Universidad Autónoma de Madrid (UAM), 28049 Cantoblanco, Madrid, España.

³ Department of Vertebrate Paleontology, Natural History Museum of Los Angeles County (NHM), 900 Exposition Boulevard, Los Angeles, California 90007, EE.UU.

⁴ Grupo de Biología, Departamento de Física Matemática y de Fluidos, Facultad de Ciencias, Universidad Nacional de Educación a Distancia (UNED), 28040 Madrid, España.

INTRODUCCIÓN

Aunque como ser volador *Archaeopteryx* probablemente representa un escalón tardío en el proceso evolutivo de las aves, este animal juega un papel central en los debates sobre el origen del vuelo de las aves, que desde bien avanzado el siglo XIX ha quedado focalizado en dos teorías antagónicas: la que se podría denominar arbórea, que preconiza que las primitivas aves iniciaban el vuelo desde los árboles, y la terrestre, que propugna un despegue desde el suelo, tras una cierta carrera para alcanzar la velocidad necesaria.

En esta discusión *Archaeopteryx* ocupa sin duda un lugar preeminente, y sus prestaciones aerodinámicas han sido motivo de discusión desde el descubrimiento mismo de los primeros especímenes fósiles de esta ave extremadamente primitiva, en la segunda mitad del siglo XIX. Al principio sus poco evolucionadas propiedades aerodinámicas fueron interpretadas como una prueba evidente de una capacidad de vuelo muy limitada (de Beer 1954; Shipman 1998), indicativa de que *Archaeopteryx* era principalmente un ave

planeadora con una capacidad de inicio propulsado del vuelo muy reducida, por no decir nula. Sin embargo, estudios posteriores centrados en la relevancia aerodinámica de las plumas, de la forma de las alas y de las articulaciones han dado paso a un cierto consenso en el que se admite la capacidad de *Archaeopteryx* para despegar desde el suelo gracias a una carrera de despegue acompañada del movimiento de aleteo de las alas (Feduccia 1993; Bock & Bühler 1995; Padian & Chiappe 1998; Burguers & Chiappe 1999; Rayner 2001; Chiappe & Dyke 2002; Hedenström 2002).

Gran parte de la discusión es debida a que en *Archaeopteryx* hay diferencias muy significativas respecto a las aves actuales: una de estas diferencias es la larga cola reptiliana, equipada con plumas dispuestas lateralmente a ambos lados de la cola ósea (figura 1) y la otra tiene que ver con la función aerodinámica del primer dedo de la mano, que sobresalía del ala. El posible uso de este dedo como elemento de control voluntario del carácter laminar o turbulento de la capa límite en el extradós del ala ha sido analizado en

otras publicaciones (Meseguer y otros 2008-a; 2008-b), habiéndose concluido que dicho dedo pudo ser empleado como un elemento activo para retrasar la entrada en pérdida del ala, jugando en cierta forma un papel aerodinámico al que en las aves más evolucionadas juega el álula (Campbell 2008), que sí actúa como un eficiente mecanismo hipersustentador de borde de ataque (Sanz y otros 1996; Meseguer y otros 2005). En esta comunicación el interés se ha centrado en el papel aerodinámico de la larga cola de *Archaeopteryx*, y su influencia en la mejora de la capacidad de despegue desde el suelo.

Para ello han sido llevadas a cabo en IDR/UPM diversas series de ensayos aerodinámicos con un modelo de *Archaeopteryx*, a fin de evaluar la influencia de la cola en las cargas aerodinámicas generadas por el ave (sustentación y resistencia aerodinámica). Aunque los ensayos han sido realizados en condiciones idealizadas, ciertamente alejadas de las de un despegue con aleteo, los resultados obtenidos permiten concluir que la cola del primitivo *Archaeopteryx* jugaba un papel aerodinámico tan relevante como el que juegan las colas de las aves actuales, que las utilizan como ayuda aerodinámica en las maniobras de despegue y aterrizaje (Meseguer & Sanz-Andrés 2007), lo que constituye un argumento más en favor de la hipótesis de que *Archaeopteryx* era capaz de despegar desde el suelo.

MODELO DE ENSAYOS E INSTALACIÓN EXPERIMENTAL

Para evaluar la influencia de la cola en las características aerodinámicas básicas de *Archeopteryx* se ha construido un modelo de ensayos aerodinámicos del ave, y se han medido la sustentación y la resistencia aerodinámica del modelo para distintas actitudes del modelo frente al viento y diferentes posiciones de la cola. El modelo ha sido construido tomando como referencia el espécimen de *Archaeopteryx* de Berlín

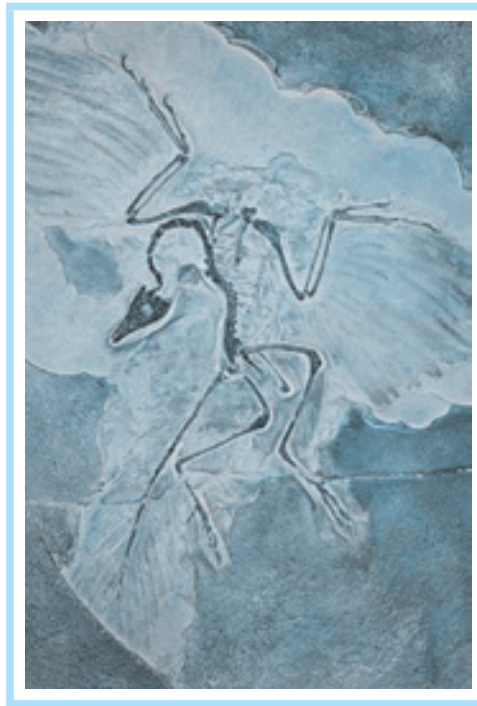


FIGURA 1. Fotografía de un registro fósil de *Archaeopteryx* donde se pueden apreciar la cola y las plumas.

a una escala que se juzga próxima a la 1/1, con una envergadura de 66 cm (cada semiala tiene una envergadura de 30 cm y el cuerpo un ancho de 6 cm).

El modelo consta de una parte central en la que se reproducen el cuerpo, el cuello, la cabeza y parte de las patas; a esta unidad central se unen, atornilladas, las alas a los lados laterales del cuerpo y la cola en la zona posterior, esta última articulada al cuerpo, de forma que se puede cambiar de modo sencillo su orientación respecto a cualquier referencia prefijada. En la figura 2 se muestran la planta y alzado lateral del modelo, y en la figura 3 se presentan diversas vistas del mismo.

Los únicos grados de libertad del modelo son el ángulo de las alas respecto al cuerpo, que en todos los ensayos realizados ha permanecido constante (el borde de salida de las alas queda sensiblemente alineado con el extradós de la cola en la posición no deflectada), el ángulo β que forma una referencia ligada al cuerpo con la horizontal, según se define en la figura 2, y el ángulo α que forma la parte plana del extradós de la cola con la

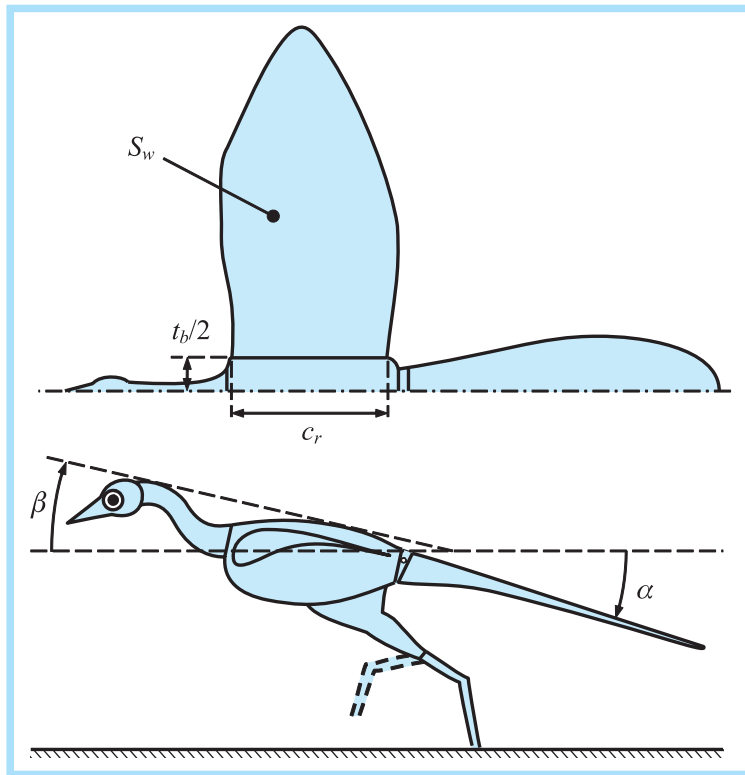


FIGURA 2.

Planta y alzado del modelo de ensayos de *Archaeopteryx* y definición de los ángulos que determinan la posición del modelo y la de la cola respecto a la corriente incidente horizontal.

horizontal. Para poder variar este ángulo β entre el cuerpo del ave y la cola existe un hueco que permite el juego necesario, hueco que en los ensayos es cuidadosamente carenado con cinta adhesiva.

Dado que el vuelo de las aves se desarrolla a números de Reynolds razonablemente pequeños, del orden de 10^5 o menos, y es el ave la que se mueve respecto al aire (lo que implica que respecto al aire la corriente incidente es de muy baja turbulencia y muy uniforme), para la realización de los ensayos

TABLA 1.

Valores del ángulo de actitud del cuerpo del modelo de ave, β (según se define en la figura 2), y del ángulo de ataque de la cola, α , empleados en los ensayos.

	$\alpha =$					
$\beta = 11^\circ$	-5,2°	1,1°	6,8°	8,9°	12,5°	15,0°
$\beta = 17^\circ$	-4,5°	1,8°	7,5°	9,2°	13,1°	15,4°

se ha utilizado el túnel aerodinámico S4 de IDR/UPM, que es un túnel de baja turbulencia (por debajo del 1%) y con un perfil de velocidades muy uniforme. La cámara de ensayos del túnel S4 tiene una sección de 0,9 m de alto y 0,9 m de ancho.

Para medir las cargas aerodinámicas el modelo ha estado rígidamente unido a una plataforma circular de 0,65 m de diámetro, que simula el suelo sobre el que corre el ave, unida a su vez a la balanza, que se sujeta al suelo del túnel (figura 4). La balanza es de extensímetros, capaz de medir las tres componentes de la fuerza y las tres del momento respecto al punto de referencia; en las fuerzas los fondos de escala son 400 N para el eje vertical (sustentación) y 100 N para los ejes horizontales de resistencia aerodinámica y fuerza lateral. En los ensayos se ha medido en primer lugar la carga sobre la plataforma (sin ave alguna) para determinar así la tara a restar a las medidas posteriores.

Además de los soportes ligados a las patas, el modelo de ave está unido a la plataforma circular con dos varillas cuya finalidad es fijar los ángulos de referencia de cuerpo y cola (figura 4). Con la varilla anterior se establece el ángulo de actitud β , y con la posterior el ángulo de ataque de la cola α . Para los ensayos se selecciona el valor del ángulo β ajustando convenientemente la posición de la varilla anterior; se selecciona también el valor del ángulo de deflexión de la cola mediante la varilla vertical posterior (que lleva hechas unas entallas donde encaja el borde de salida de la cola) y se pone en marcha el túnel. Alcanzada la velocidad de ensayo, las señales de la balanza, junto con las que proporciona el tubo Pitot de referencia (para medir la presión dinámica del ensayo), se guardan en un ordenador para su posterior análisis.

Se han medido las fuerzas de sustentación y resistencia aerodinámica para dos posiciones del cuerpo, ángulo β , y, para cada una de ellas se han considerado cinco valores distintos del ángulo de ataque de la cola α , según se detalla en la tabla 1. Se han considerado además dos velocidades de la co-

riente incidente, 12 m/s y 16 m/s, de manera que el número de Reynolds basado en la cuerda de la raíz del ala ha estado en torno a cien mil.

Para calcular los coeficientes aerodinámicos de sustentación y de resistencia aerodinámica las fuerzas medidas han sido adimensionalizadas con la suma del área en planta de las alas, $2S_w$, del área en planta de la cola, S_t , y del área de la parte del cuerpo comprendida entre las alas, S_b , es decir

$$S = 2S_w + S_t + S_b = 0,105 \text{ m}^2$$

como presión dinámica de referencia se ha empleado la presión dinámica medida con el tubo Pitot,

$$q = \frac{\rho U^2}{2}$$

donde ρ es la densidad del aire y U la velocidad del aire en la cámara de ensayos del túnel S4, por tanto

$$c_L = \frac{2L}{\rho U^2 S} \quad \text{y} \quad c_D = \frac{2D}{\rho U^2 S}$$

Hay que añadir que como en ningún caso el área frontal del modelo y del equipamiento unido al mismo ha supuesto más del 10% del área de la sección de la cámara de ensayos, no se ha juzgado necesario aplicar correcciones por bloqueo de la cámara de ensayos a los resultados medidos.

RESULTADOS

Los resultados obtenidos se muestran en la figura 5, donde se presenta para distintos valores del ángulo de ataque del ave, β , y de la velocidad incidente U , la variación con el ángulo de ataque de la cola, α , del incremento de coeficiente de sustentación y el incremento de coeficiente de resistencia aerodinámica,

$$\Delta c_L(\alpha) = c_L(\alpha) - c_L(0)$$

y
$$\Delta c_D(\alpha) = c_D(\alpha) - c_D(0)$$

respectivamente, donde $c_L(\alpha)$ y $c_D(\alpha)$ son los coeficientes medidos cuando el ángulo de ataque de la cola es α y $c_L(0)$

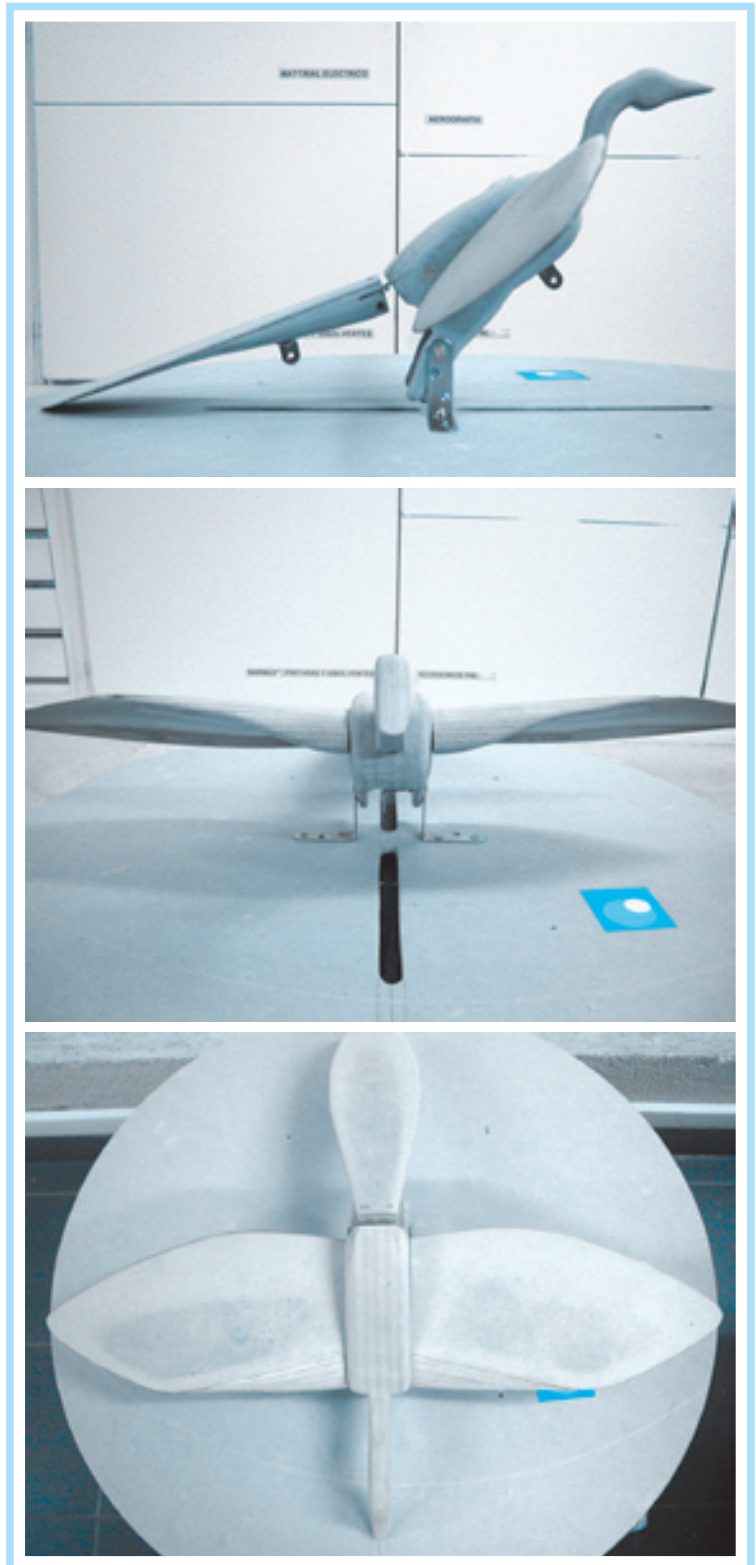


FIGURA 3.

Fotografías del modelo de ensayos donde se muestra el hueco existente entre cuerpo y cola, inexistente en los ensayos ya que en cada posición se ha carenado convenientemente el hueco entre ambas partes. Obsérvese que en el modelo la parte final del extradós de la cola es prácticamente plana.

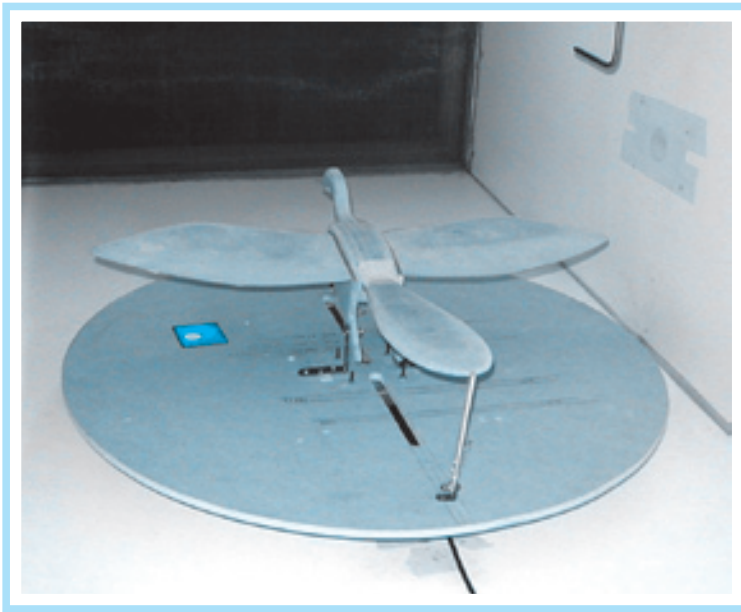


FIGURA 4.

Vista del modelo en la cámara de ensayos del túnel S4.

y $c_D(0)$ los valores correspondientes para $\alpha = 0^\circ$. Se puede ilustrar la relevancia de tales resultados con un sencillo ejemplo; supóngase que los efectos de la cola y de cualquier otra causa que incida en la aerodinámica del ave están desacoplados (como el batimiento de las alas), si la cola no está deflectada la velocidad necesaria para el despegue se obtiene de la expresión

$$L = \frac{1}{2} \rho U^2(0) S c_L(0)$$

y cuando está deflectada un ángulo α la ecuación de equilibrio a considerar es

$$L = \frac{1}{2} \rho U^2(\alpha) S c_L(\alpha)$$

Igualando ambas expresiones se obtiene la relación entre las velocidades de despegue en uno y otro caso

$$\eta = \frac{U(\alpha)}{U(0)} = \sqrt{\frac{c_L(0)}{c_L(\alpha)}} = \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{\Delta c_L(\alpha)}{c_L(0)}}} \quad (1)$$

El cociente de velocidades η aparece representado en la figura 6 en función de $c_L(0)$ para diferentes valores de $\Delta c_L(\alpha)$. Por otra parte se debe tener en cuenta que el incremento de resistencia permanece prácticamente invariable con el ángulo α , siempre que la cola no haya entrado en pérdida (esto es así porque mientras no se produzca la pérdida, la única contribución de la cola a la resistencia aerodinámica del ave es de fricción, proporcional al área mojada de la cola que obviamente no cambia al variar α). Como la resistencia aerodinámica en el despegue disminuye si la velocidad de despegue es menor, y como la potencia necesaria es

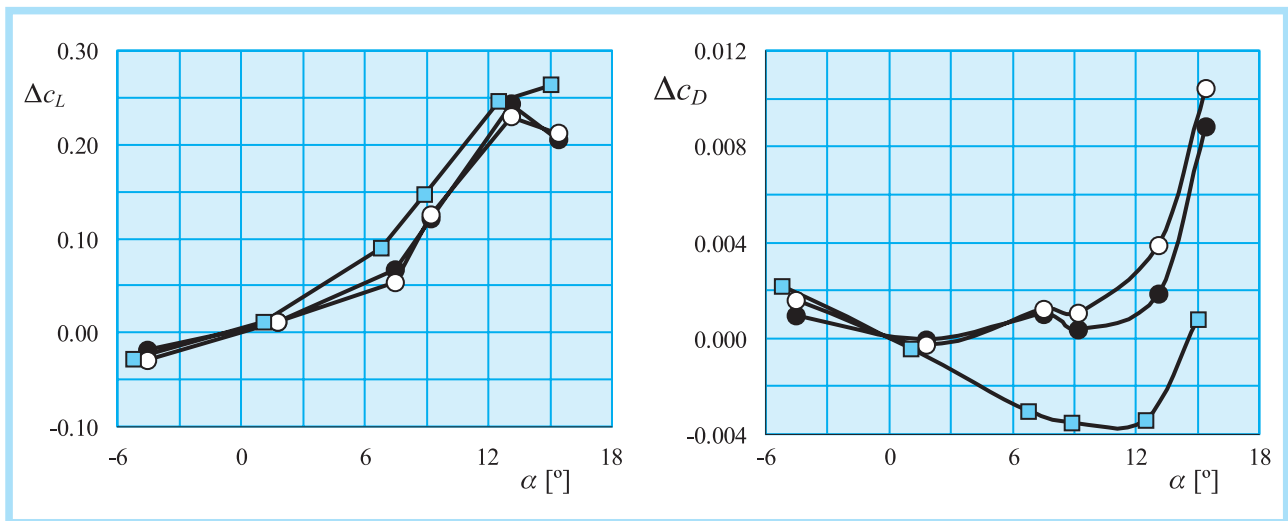


FIGURA 5.

Variación con el ángulo de ataque de la cola α del incremento de coeficiente de sustentación y del incremento de coeficiente de resistencia aerodinámica, $\Delta c_L(\alpha) = c_L(\alpha) - c_L(0)$ y $\Delta c_D(\alpha) = c_D(\alpha) - c_D(0)$ respectivamente. Los símbolos identifican las condiciones de los ensayos (ángulo de ataque del ave, β , y velocidad de la corriente incidente, U) de acuerdo con la clave: $\beta = 11^\circ$, $U = 12$ m/s (círculos blancos); $\beta = 11^\circ$, $U = 16$ m/s (círculos negros); $\beta = 17^\circ$, $U = 12$ m/s (cuadrados).

proporcional al cubo de la velocidad, se tiene que la relación entre la potencia necesaria para el despegue con la cola deflectada respecto al caso sin deflectar varía como η^3 , función que también aparece representada en la figura 6. Nótese que según esta gráfica la efectividad de la cola es menor conforme aumenta el coeficiente de sustentación global del ave, pero incluso con un valor elevado del coeficiente de sustentación global, por ejemplo $c_L(0) \cong 2$ (como se sugiere en Burger & Chiappe 1999), y un valor modesto del incremento de sustentación, $\Delta c_L(0) \cong 0,25$, se obtiene que la disminución en la velocidad de despegue es del 6%. $U(\alpha) = 0,94 U(0)$, y en tal caso la potencia necesaria para el despegue viene a ser un 16% inferior a la necesaria sin deflexión de la cola.

Estos resultados están en consonancia con los aportados en otras fuentes, habiéndose sugerido que la cola de *Archaeopteryx* podría haber proporcionado entre el 22% y el 28% de la superficie sustentadora del ave (O'Farrell y otros 2002). Si además se añade un uso aerodinámicamente eficiente de la misma, se obtiene que con su deflexión la sustentación global puede ser aumentada notablemente, mientras que la resistencia aerodinámica permanece prácticamente sin cambios. Los resultados también muestran que, como se ha dicho, la efectividad de la cola decrece conforme es mayor el coeficiente de sustentación del ave, pero aun así la disminución de la potencia necesaria para el despegue resulta ser muy notable.

BIBLIOGRAFÍA

BOCK, W. J. & BÜHLER, P.: "Origin of birds: feathers, flight and homiothermy". *Archaeopteryx*, Vol. 13, pp. 5-13 (1995).
 BURGUERS, P. & CHIAPPE L. M.: "The wing of Archaeopteryx as a primary thrust generator". *Nature*, Vol. 399, pp. 60-62 (1999).
 CAMPBELL, K. E.: "The manus of archaeopterygians: implications for avian ancestry". *Oryctos*, Vol. 7, pp. 13-26 (2008).
 CHIAPPE, L. M. & DYKE, G. J.: "The Mesozoic radiation of birds". *Annual Review*

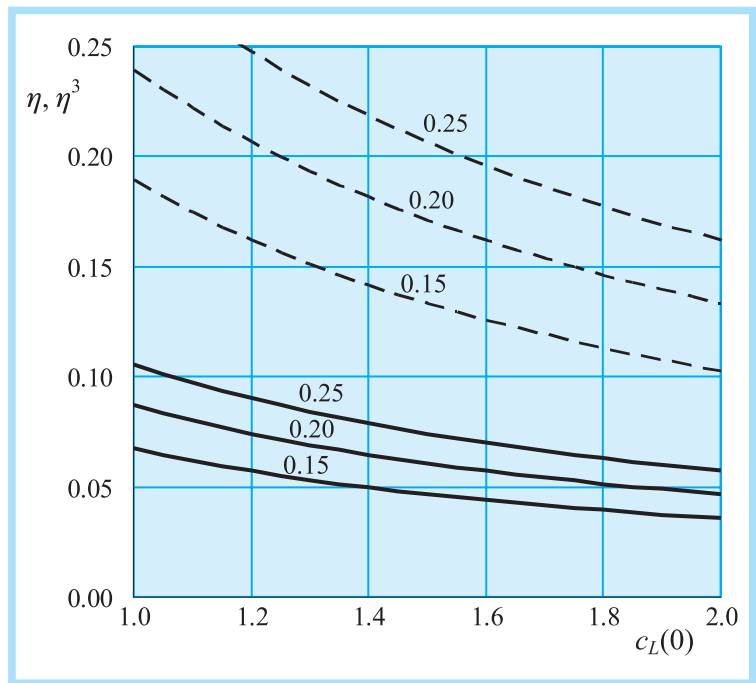


FIGURA 6.

Variación con el coeficiente de sustentación del ave correspondiente a la posición no deflectada de la cola $c_L(0)$ de la relación $\eta = U(\alpha)/U(0)$ entre las velocidades de despegue con la cola deflectada y sin deflectar dada por la expresión (1), líneas a trazos; en la misma figura se muestra también la función η^3 , proporcional a la potencia requerida para el despegue, líneas continuas. Las etiquetas en las curvas indican el valor de $\Delta c_L(\alpha) = c_L(\alpha) - c_L(0)$.

of Ecology and Systematics, Vol. 33, pp. 91-124 (2002).
 DE BEER, G.: "Archaeopteryx lithographica". *A study based upon the British Museum Specimen* (Trustees of the British Museum, London), pp. 54-57 (1954).
 FEDUCCIA, A.: "Evidence from claw geometry indicating arboreal habits of Archaeopteryx". *Science*, Vol. 259 (5096), pp. 790-793 (1993).
 HEDENSTRÖM, A.: "Aerodynamics, evolution and ecology of avian flight". *Trends in Ecology and Evolution*, Vol. 17, pp. 415-422 (2002).
 MESEGUER, J. & SANZ ANDRÉS, A.: *Aerodinámica del vuelo: aves y aeronaves*. Cuadernos Aena, 9, Aena, Aeropuertos Españoles y Navegación Aérea (2007).
 MESEGUER, J., FRANCHINI, S., PÉREZ-GRANDE, I. & SANZ, J. L.: "On the aerodynamics of leading-edge high-lift devices of avian wings". *Proc. IMechE, Part G: J. Aerospace Engineering*, Vol. 219, pp. 63-68 (2005).
 MESEGUER, J., SANZ-ANDRÉS, A., PÉREZ-GRANDE, I., FRANCHINI, S., SANZ, J. L., ORTEGA, F. & CHIAPPE, L.: "Control de capa límite en el vuelo a bajos números

- de Reynolds". *Ingeniería Aeronáutica y Astronáutica*, 387, pp. 15-24 (2008-a).
- MESEGUER, J., SANZ-ANDRÉS, A., PÉREZ-GRANDE, I., FRANCHINI, S., SANZ, J. L., ORTEGA, F. & CHIAPPE, L. M.: "Use of turbulence generators as stall-delaying devices in flight at low Reynolds numbers". Proc. IMechE, Part G: *J. Aerospace Engineering*, Vol. 222, pp. 1007-1013 (2008-b),
- O'FARRELL, B., DAVENPORT, J. & KELLY, T.: "Was Archaeopteryx winging-ground effect flier?". *Ibis*, Vol. 144, pp. 686-688 (2002).
- PADIAN, K. & CHIAPPE, L. M.: "The origin and early evolution of birds". *Biol. Review Cambridge Philosophical Society*, Vol. 73, pp. 1-42 (1998).
- RAYNER, J. M. V.: "On the origin and evolution of flapping flight aerodynamics in birds". In: Gauthier, J., and Gall, L. F. (eds.) *Proceedings of the International Symposium in Honour of John H. Ostrom*, Yale Peabody Museum, pp. 363-85 (2001).
- SANZ, J. L., CHIAPPE, L. M., PÉREZ MORENO, B., BUSCALIONI, A. D., MORATALLA, J. J., ORTEGA, F. & POYATO-ARIZA, F.: "An Early Cretaceous bird from Spain and its implications for the evolution of flight". *Nature*, Vol. 382, pp. 442-445 (1996).
- SHIPMAN, P.: "Taking wing: Archaeopteryx and the evolution of bird flight". *Simon and Schuster*, p. 336 (1998).

Historia de la Ingeniería Aeronáutica

EFEMÉRIDES - 1923



Nacimiento de la revista "AÉREA"

Nació "AÉREA" una revista mensual ilustrada de aviación. El número 1 tenía fecha de junio de 1923. Sale a la luz con el deseo de varios amantes de la aviación - gesto maravilloso del progreso de la ciencia humana-. Su propósito era contribuir con su labor al fomento de la navegación aérea en España. En las imágenes, la portada de la revista y el saludo de su primer número.

ANTONIO GONZÁLEZ BETES