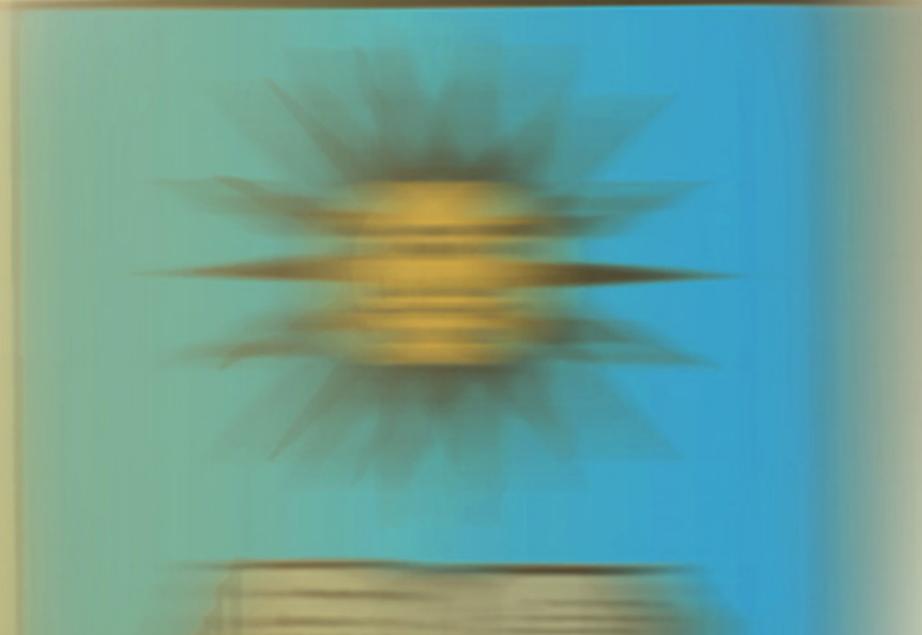


POLITÉCNICA

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID

www.upm.es



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID

Escuela Universitaria de
Ingeniería Técnica Aeronáutica

HELICÓPTEROS

Profesores: *Miguel A. Barcala Montejano*
Ángel A. Rodríguez Sevillano

POLITÉCNICA

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID

Escuela Universitaria de
Ingeniería Técnica Aeronáutica

PALAS

POLITÉCNICA





SELECCIÓN DEL PERFIL

- La elección del perfil está determinada por los requerimientos operacionales del helicóptero.
- Las condiciones de operación del perfil dependen en gran medida de la configuración de vuelo.
- Es imposible definir un perfil óptimo sin que exista un enfrentamiento entre los requisitos más conflictivos.



SELECCIÓN DEL PERFIL

- Depende de la sección a lo largo de la envergadura de la pala.
- Compaginar:
 - características la pala que avanza (alto valor de Mach de divergencia de resistencia, para valores pequeños de C_L), con las
 - características de la pala que retrocede (alto valor de C_L máx, para bajo Mach).

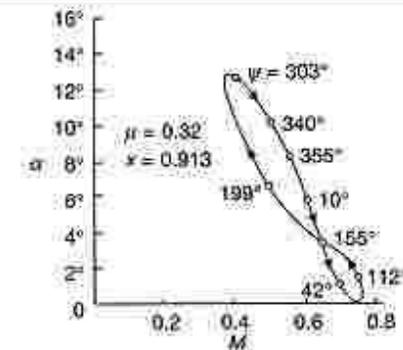


Fig. 6.31 'Figure-of-eight' variation of incidence and Mach number

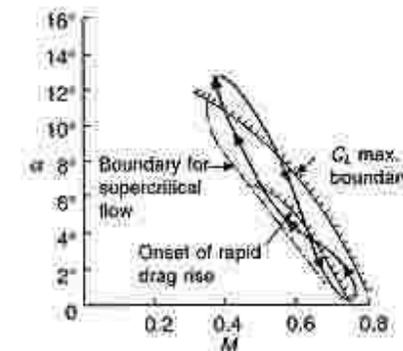


Fig. 6.32 Stall and compressibility boundary



SELECCIÓN DEL PERFIL

- También se deberá mantener un buen rendimiento aerodinámico L/D a los valores intermedios de C_L y Mach en la pala que avanza y retrocede en vuelo vertical.
- Además, interesará un coeficiente de momento reducido (C_m del orden de 0,01 para minimizar la torsión de la pala y los esfuerzos en los controles de variación del paso).



SELECCIÓN DEL PERFIL

- Inicialmente se utilizaron perfiles convencionales, muy conocidos por su uso en aviación, como el **NACA** 0012 o el **NACA** 23012; fue hasta la década de los 70.
- Posteriormente comenzaron a desarrollar sus propias familias de perfiles adecuadas a las nuevas exigencias y adaptadas a las condiciones particulares de funcionamiento de los vehículos de alas giratorias.
 - Por ejemplo, la familia **OAxxx** corresponde a la colaboración *ONERA/Aérospatiale*.
 - Perfiles **VRxx** han sido desarrollados por *Boeing Vertol* o **DM-Hx** por *DFVLR* y *MBB*.
- Este desarrollo permite, además, diseñar perfiles con el objetivo de reducir la resistencia y por lo tanto la potencia necesaria del helicóptero.



SELECCIÓN DEL PERFIL

- Así se han desarrollado distintos tipos, como por ejemplo el tipo BERP.
- Los nuevos diseños de punta de pala son fruto del estudio de las corrientes de aire en esa zona y del intento de adaptar la velocidad de la corriente supersónica en ciertas zonas, a subsónica mediante la aparición de ondas de choque.



SELECCIÓN DEL PERFIL

- En la pala de un rotor real existe una variación del perfil aerodinámico a lo largo de su envergadura con el objeto de optimizar su comportamiento
- Criterios:
 - Coeficiente de sustentación máximo $c_{l_{máx}}$ alto - mayor o igual a 1,6- para número Mach en el torno a 0,4.
 - Mach de divergencia de resistencia M_{DD} alto -superior a 0,75 o 0,80- para coeficientes de sustentación pequeños, es decir, próximos a cero.
 - Coeficiente de momento respecto al centro aerodinámico del perfil c_{mCA} bajo -inferior en valor absoluto a 0,01- en el intervalo de número de Mach esperados en la pala.
 - Espesor relativo del perfil en torno al 12 o 13% .



SELECCIÓN DEL PERFIL

- Tabla resumen.

| | Perfil | $C_{l_{máx}}$ a $M=0,4$ | Mdd a $Cl=0$ | C_d a $M=0,6$ y $Cl=0,6$ |
|---|-----------------------|-------------------------|--------------|----------------------------|
| 1 | NACA 64A608 | 1,400 | 0,7550 | 0,0060 |
| 2 | NACA 64A(4.5)12 | 1,430 | 0,7350 | 0,0085 |
| 3 | NACA 64A612 | 1,450 | 0,6900 | 0,0080 |
| 4 | NACA 64A516 | 1,470 | 0,6850 | 0,0089 |
| 5 | V23010-1.58 0° TE tab | 1,460 | 0,7940 | 0,0108 |
| 6 | V23010-1.58 3° TE tab | 1,420 | 0,7980 | 0,0110 |
| 7 | VR-7 0° TE tab | 1,500 | 0,7420 | 0,0081 |
| 8 | VR-7 -3° TE tab | 1,460 | 0,7500 | 0,0084 |
| 9 | VR-7 -6° TE tab | 1,410 | 0,7570 | 0,0090 |



SELECCIÓN DEL PERFIL

- De entre las distintas curvas que aparecen para cada coeficiente en función del número de Mach, nuestro interés se centra en las correspondientes al número de Mach de la sección característica de la pala, situada en el 70% de su envergadura ($x=0,70$).
- Dado que en vuelo a punto fijo, que es la condición que se analizará más adelante, el Mach en la punta se ha establecido en 0,6, en la sección característica será el 70% de ese valor, esto es, 0,45.



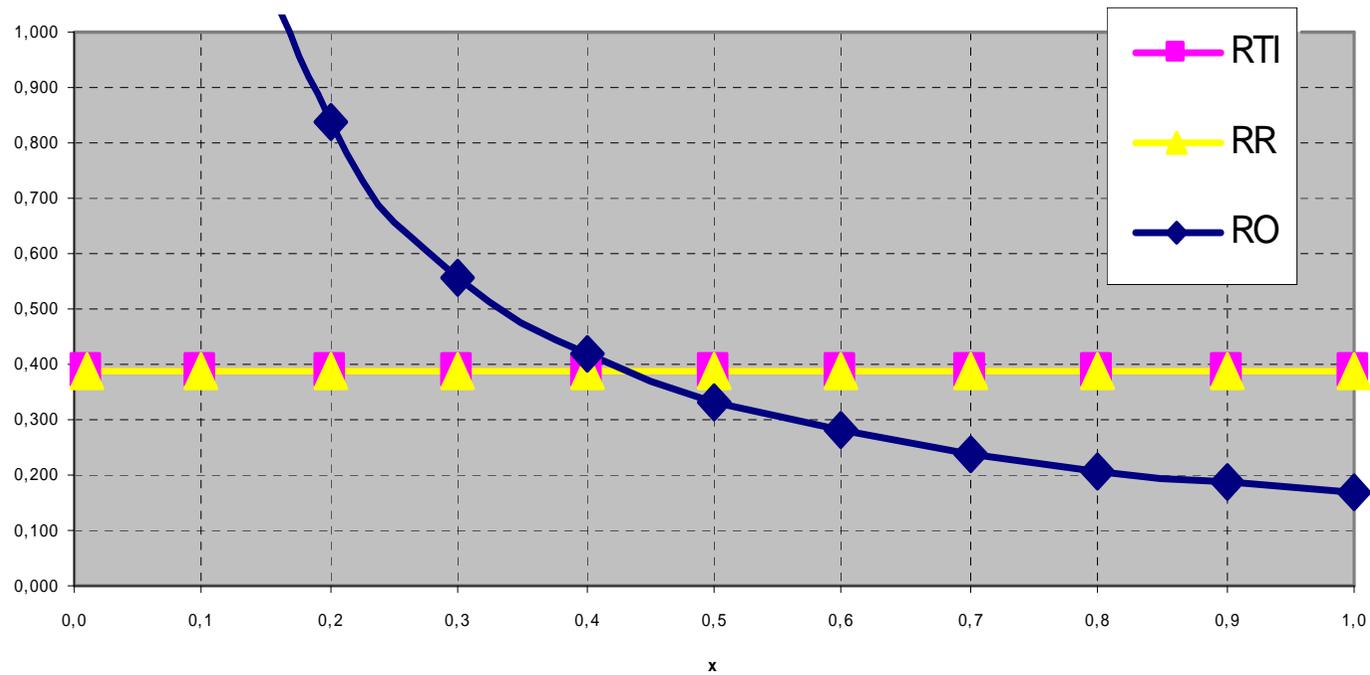
FORMA EN PLANTA

- Las puntas de las palas son importantes ya soportan las presiones dinámicas más altas.
- Son el origen de la formación de los torbellinos de punta de pala.
- Son las que generan la mayor parte de la resistencia y ruido del rotor.



FORMA EN PLANTA

Distribución de cuerdas vs TIPO ROTOR, $W1=2900$, $q_t=-12^\circ$, $h=NM$

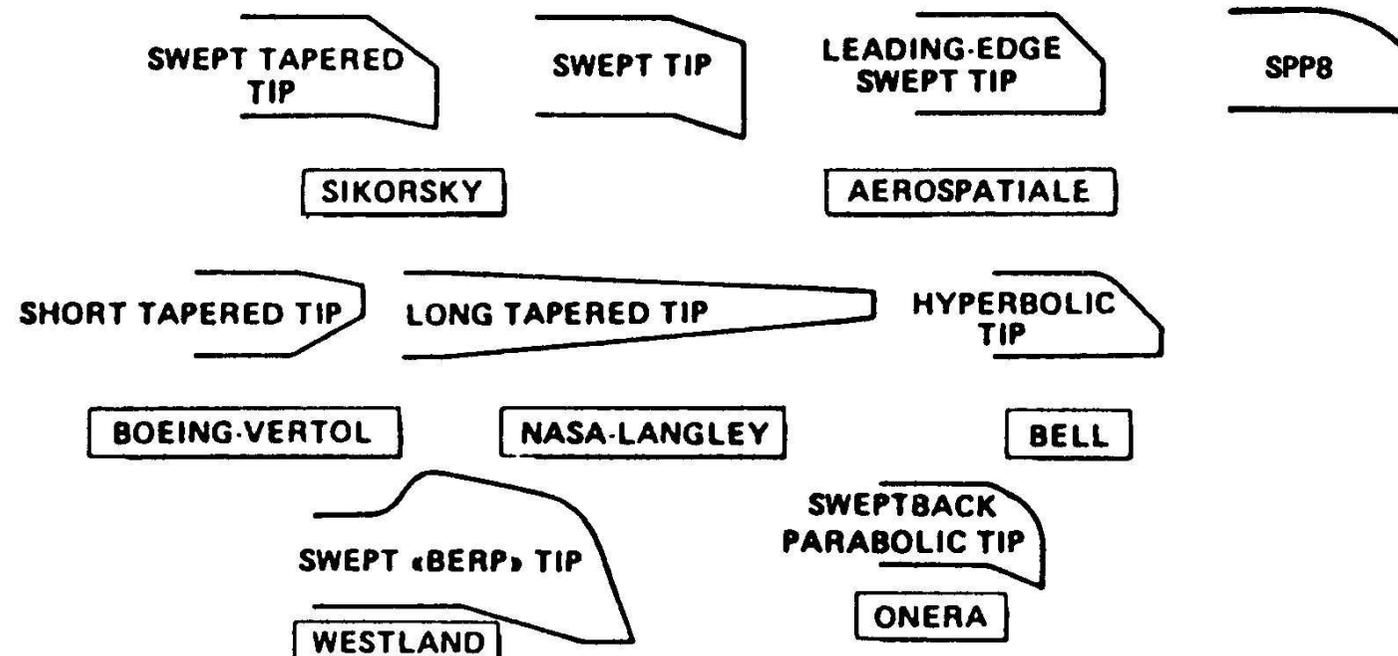




FORMA EN PLANTA

- Las figuras 12-3 y 12-4 muestran algunos de los principales diseños en producción o desarrollo.

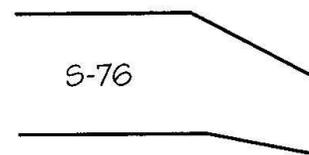
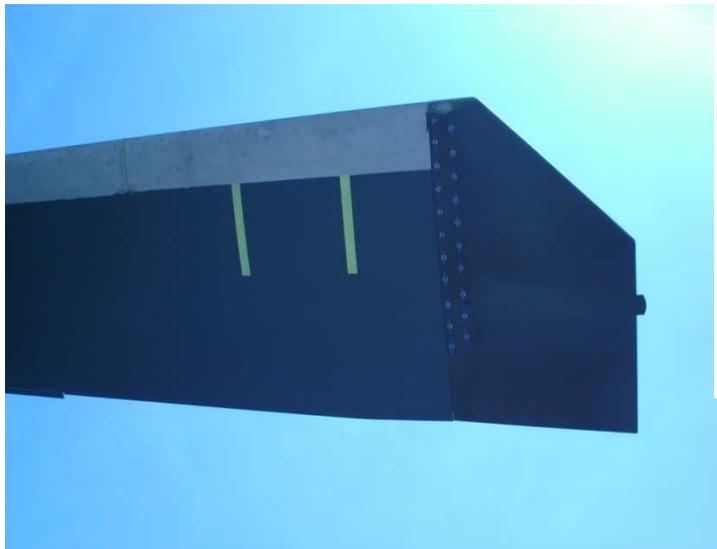
- Fig.



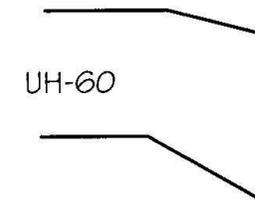


FORMA EN PLANTA

- Figura 12-4.



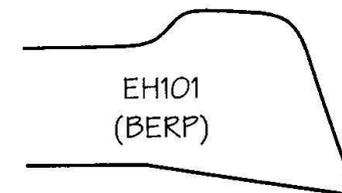
S-76



UH-60



AH-64 Apache



EH101
(BERP)



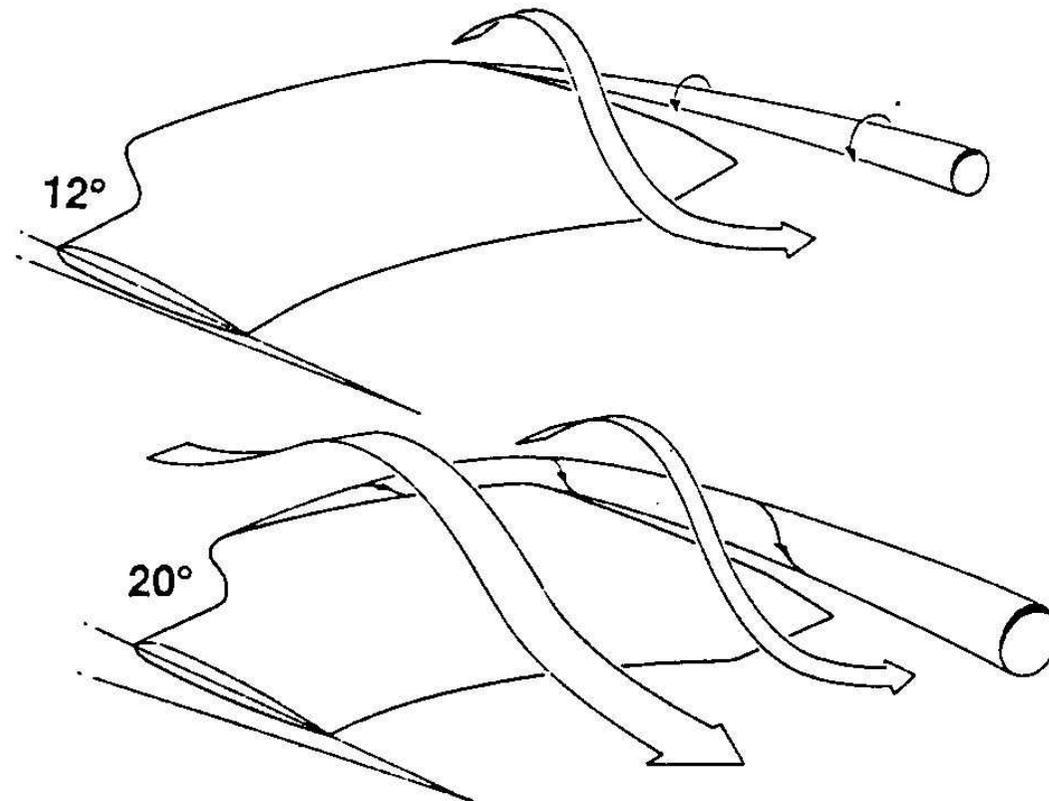
FORMA EN PLANTA

- Un ejemplo de estos desarrollos es el denominado **BERP** (*British Experimental Rotor Program*) utilizado en el *Westland Lynx* y que se muestra en la figura 12-4 y 12-5.
- Este diseño se caracteriza por una gran extensión de la cuerda inmediatamente después de la punta.
- Entre otros efectos, retrasa el flujo transónico en la pala que avanza y crea un efecto favorable para altos ángulos de ataque en la pala que retrocede.



FORMA EN PLANTA

- Figura 12-5



BERP Tip High Angle of Attack Behaviour



TORSIÓN

- Para vuelo estacionario se recomiendan valores de torsión de la pala entre -12° y -14° :
 - proporcionan un campo de velocidades inducidas más uniforme a lo largo del rotor que asegurará que las secciones de punta de pala operen por debajo del Mach de divergencia de resistencia.
- Sabemos que los torbellinos de punta afectan de forma drástica a la distribución de sustentación a lo largo de la envergadura, especialmente cerca de las puntas, aumentando el ángulo de ataque en el exterior y reduciéndolo en el interior.
- Se puede utilizar una distribución no lineal de torsión para atenuar el efecto perjudicial de la interacción de los torbellinos y modificando la variación del ángulo de ataque a lo largo de la envergadura.



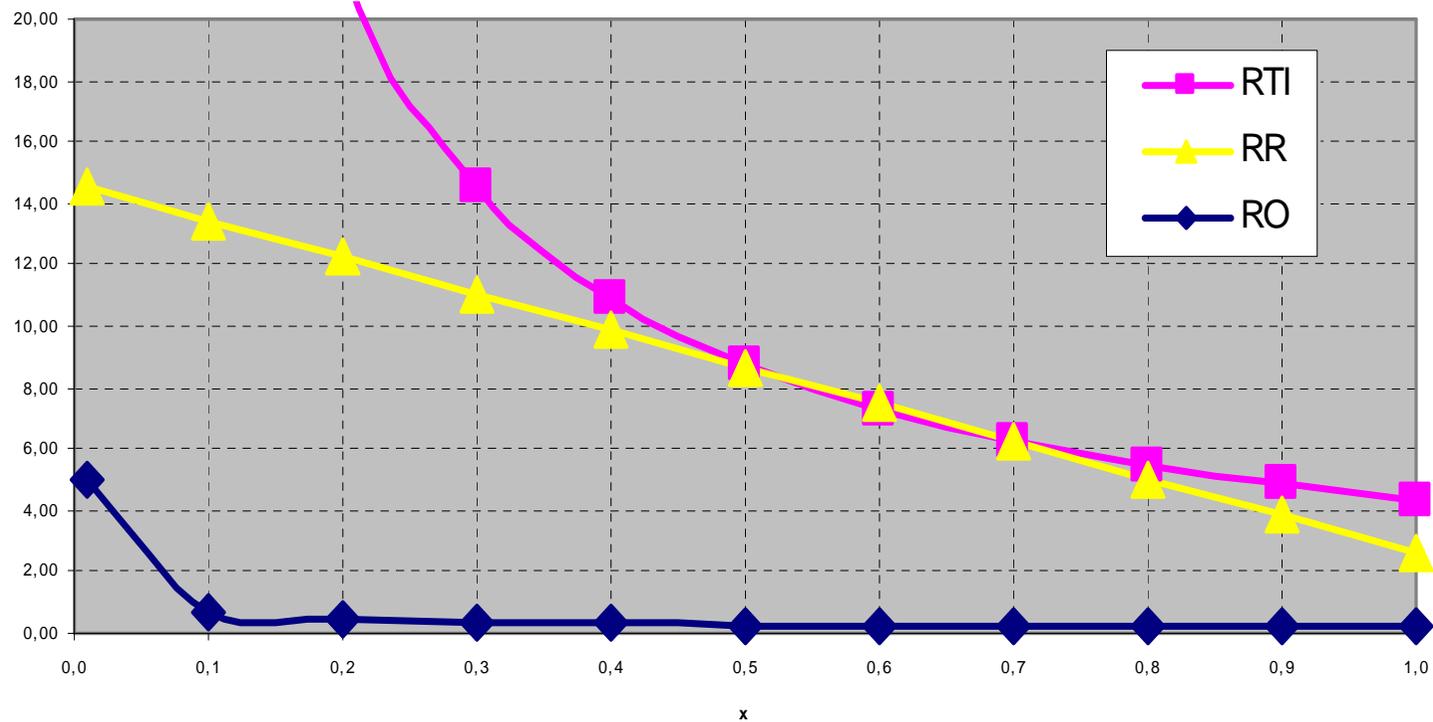
TORSIÓN

- En aras de mayores mejoras en vuelo estacionario es posible combinar grandes valores de torsión con flecha positiva en las puntas y ángulo diedro.



TORSIÓN

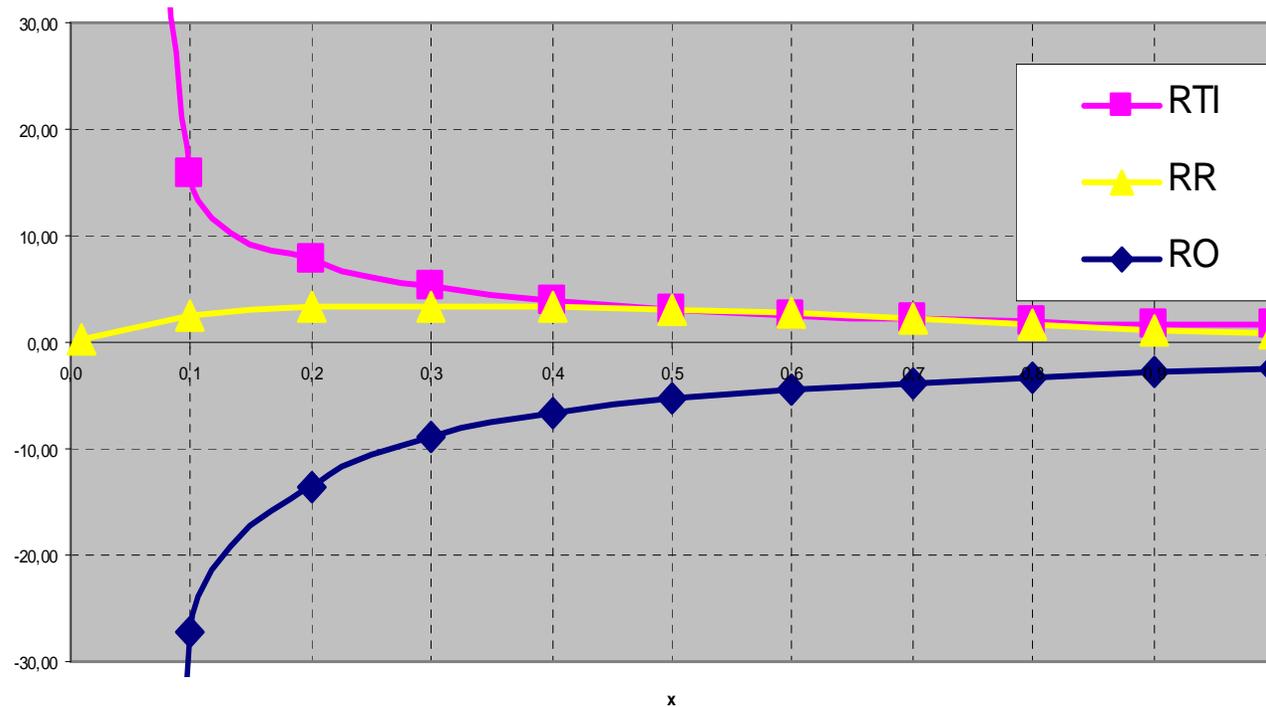
Distribución de torsión vs TIPO ROTOR, $W1=2900$, $q_t=-12^\circ$, $h=NM$





TORSIÓN

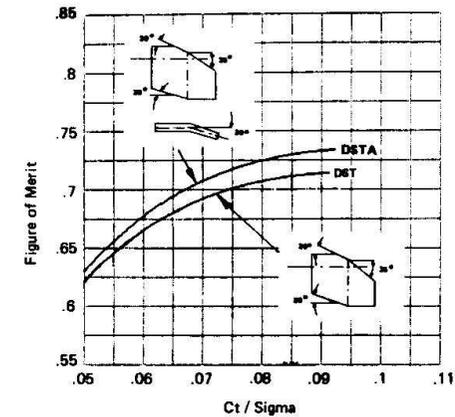
Distribución de alfa de cada sección vs TIPO ROTOR, $W1=2900$
, $q_t=-12^\circ$, $h=NM$



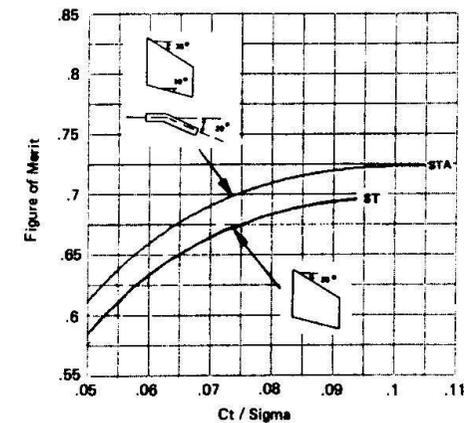


TORSIÓN

- Figura 12-2. En la figura 12-2 se muestra un estudio hecho por ONERA sobre las mejoras en el factor de mérito al aumentar la torsión para dos velocidades distintas.



Effect of blade tip anhedral on BLACK-HAWK hover performance, $M_{tip}=0.6$

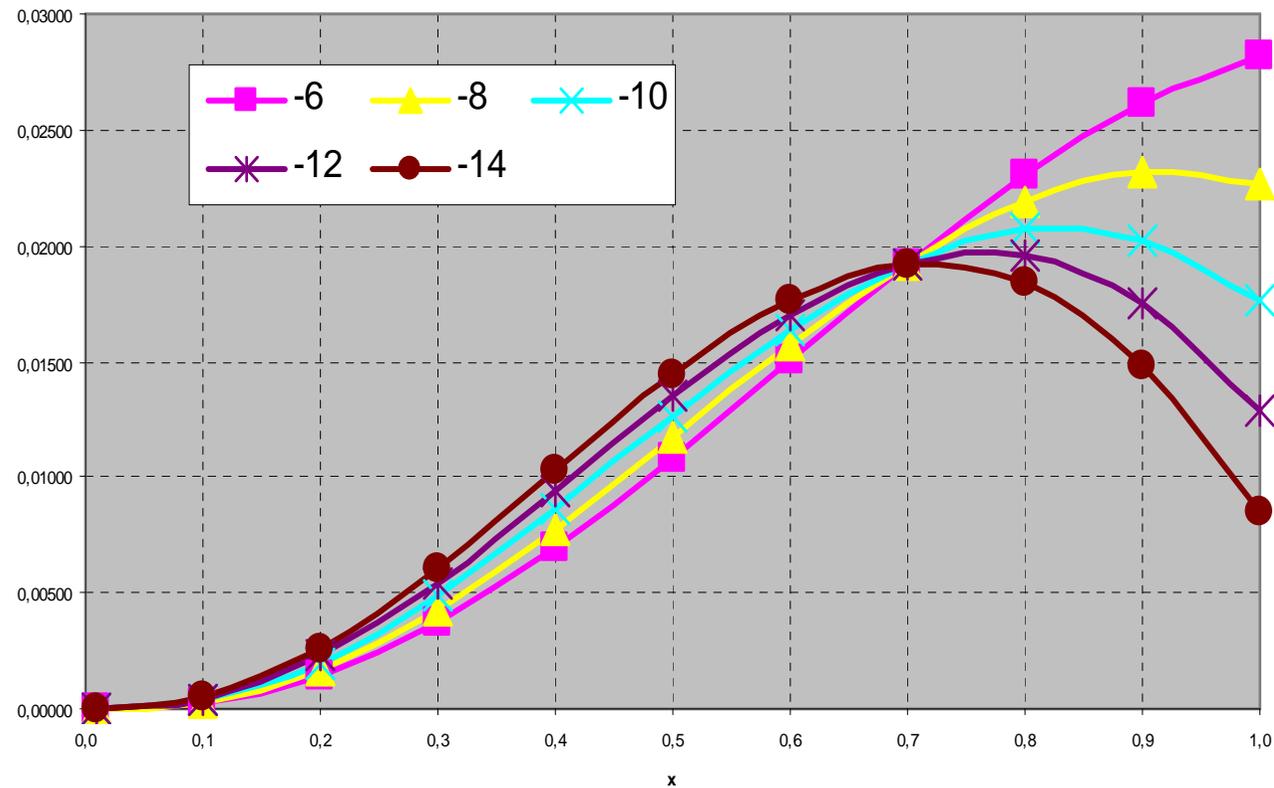


Effect of blade tip anhedral on S-76 hover performance, $M_{tip}=0.6$



TORSIÓN

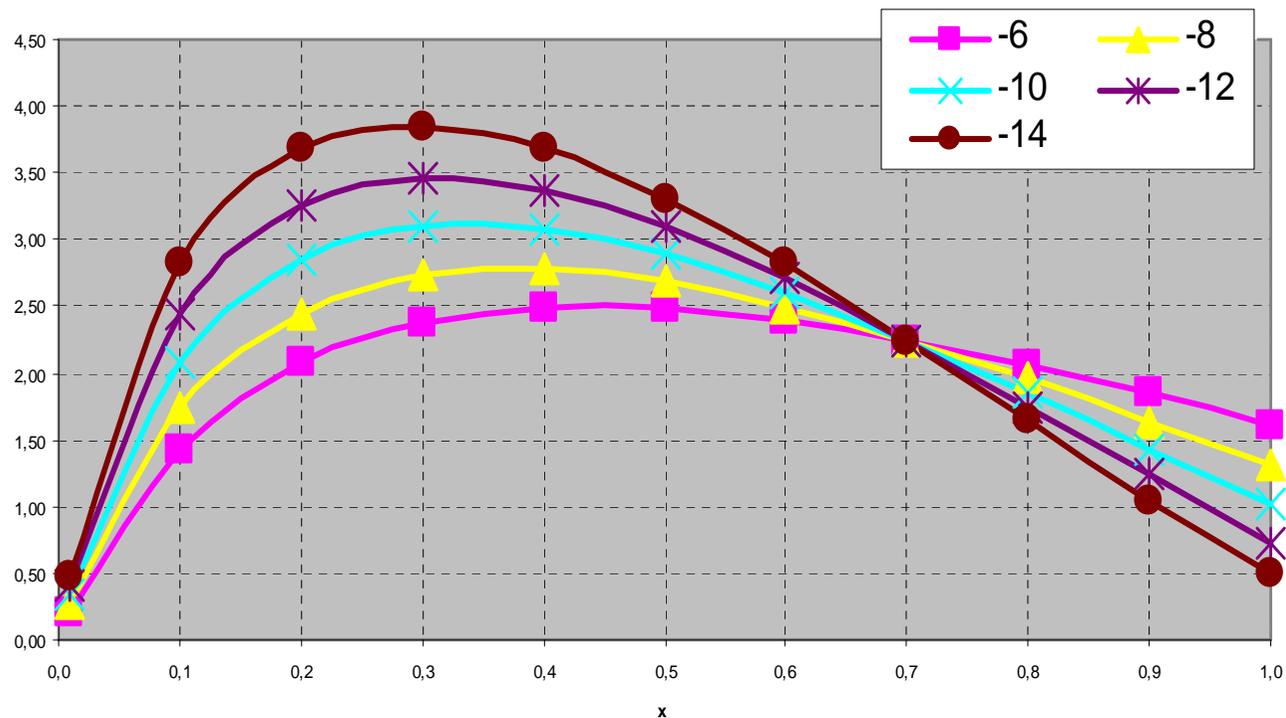
Distribución de CT vs torsión en punta, $W1=2900$, $h=NM$





TORSIÓN

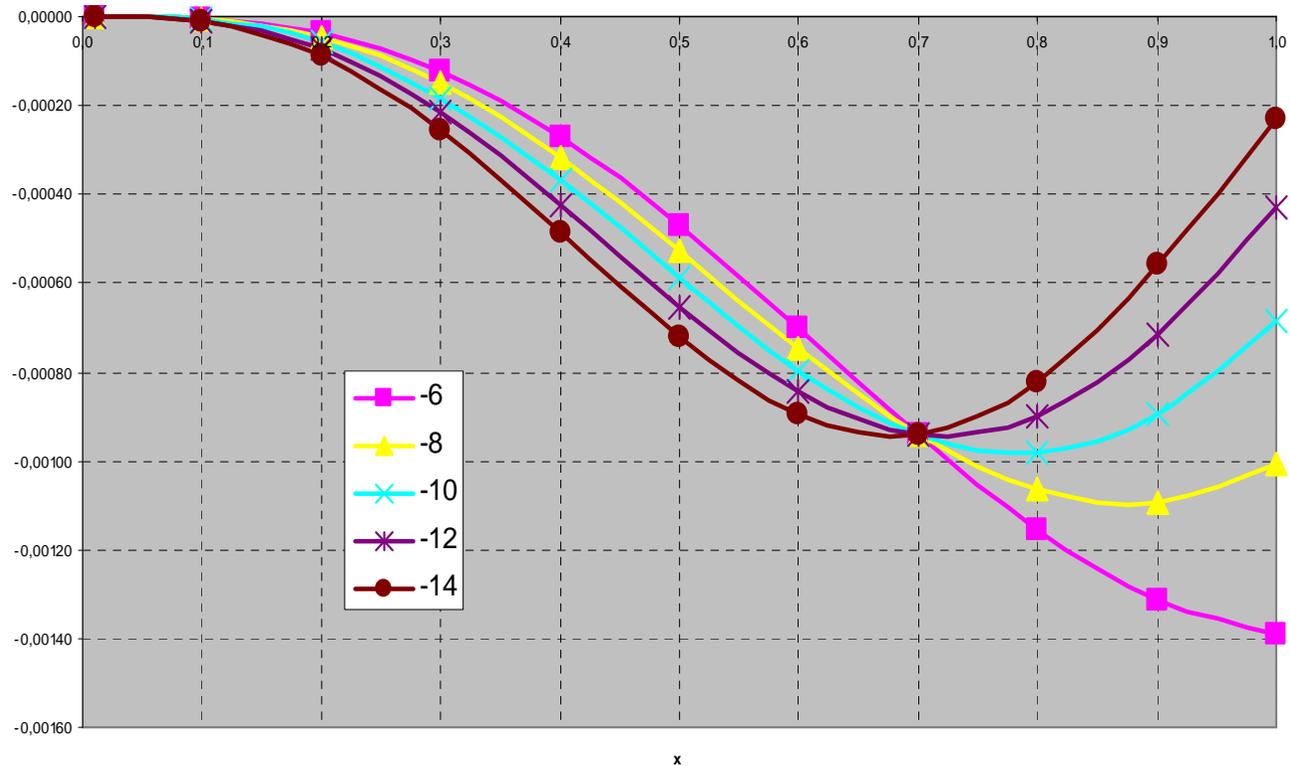
Distribución de alfa de cada sección vs torsión en punta,
 $W1=2900$, $h=NM$





TORSIÓN

Distribución de CQi vs torsión en punta, $W1=2900$, $h=NM$





CONCEPCIÓN TECN. DE LA PALA

- Materiales compuesto:
 - compuesto por fibras rectas y largas situadas en el interior de una matriz que mantiene a las fibras unidas y distribuye los esfuerzos.
- Las fibras soportan la mayor parte de las cargas mientras que la matriz se responsabiliza de la tolerancia al daño (golpes) y del comportamiento a fatiga.
- Las fibras se sitúan en capas o láminas superpuestas en la dirección del espesor obteniendo estructuras que se llaman laminados.
- Variando las secuencias de apilado y las orientaciones se pueden conseguir comportamientos radicalmente diferentes en resistencia, rigidez, tolerancia al daño, estabilidad dimensional o delaminación.
- En general, la desventaja más clara de los materiales compuestos es el precio.



CONCEPCIÓN TECN. DE LA PALA

- Las características de los materiales y de los procesos encarecen mucho el producto.
- Para ciertas aplicaciones las óptimas características mecánicas como la alta rigidez específica (E/D), la buena estabilidad dimensional, la tolerancia a alta temperaturas, la resistencia a la corrosión, la ligereza o una mayor resistencia a la fatiga que los materiales clásicos, compensan el alto precio.



CONCEPCIÓN TECN. DE LA PALA

- La construcción de palas usando materiales compuestos también repercute en el mantenimiento y en su conservación ya que por ejemplo ante un impacto, las palas no se astillan, por lo que ante un choque moderado en principio no saltarían fragmentos que pudiesen afectar al resto de palas o elementos estructurales.
- La delaminación es uno de los grandes enemigos de los materiales compuestos ya que si es interna se producen bajadas drásticas en las propiedades mecánicas de la zona dañada, la cual ha de ser detectada y evaluada mediante métodos de ensayos no destructivos bastante costosos.



CONCEPCIÓN TECN. DE LA PALA

- Un rotor principal esencialmente está constituido por un conjunto de palas unidas mediante la cabeza del mismo.
- Las palas en rotación generan la sustentación y la tracción necesaria para el vuelo del helicóptero.
- Básicamente, las sollicitaciones a las que ven sometidas las palas serán:
 - fuerza centrífuga,
 - fuerzas aerodinámicas -por ser una superficie sustentadora en movimiento-,
 - fuerzas de inercia -debidas al movimiento de la pala según los ejes de batimiento, arrastre, etc.-
 - y las fuerzas gravitatorias.



CONCEPCIÓN TECN. DE LA PALA

- La actuación combinadas de todas estas fuerzas generan unos esfuerzos y momentos a lo largo de las palas y determinar el estado de esfuerzos de las mismas.
- La distribución de masas de la pala, por tanto, será importante.
- Básicamente todas las palas constarán de un larguero, un recubrimiento de pequeño espesor, un corazón o relleno de la misma y la punta de pala.
- Existen desarrollos tanto en materiales metálicos como en materiales compuestos.



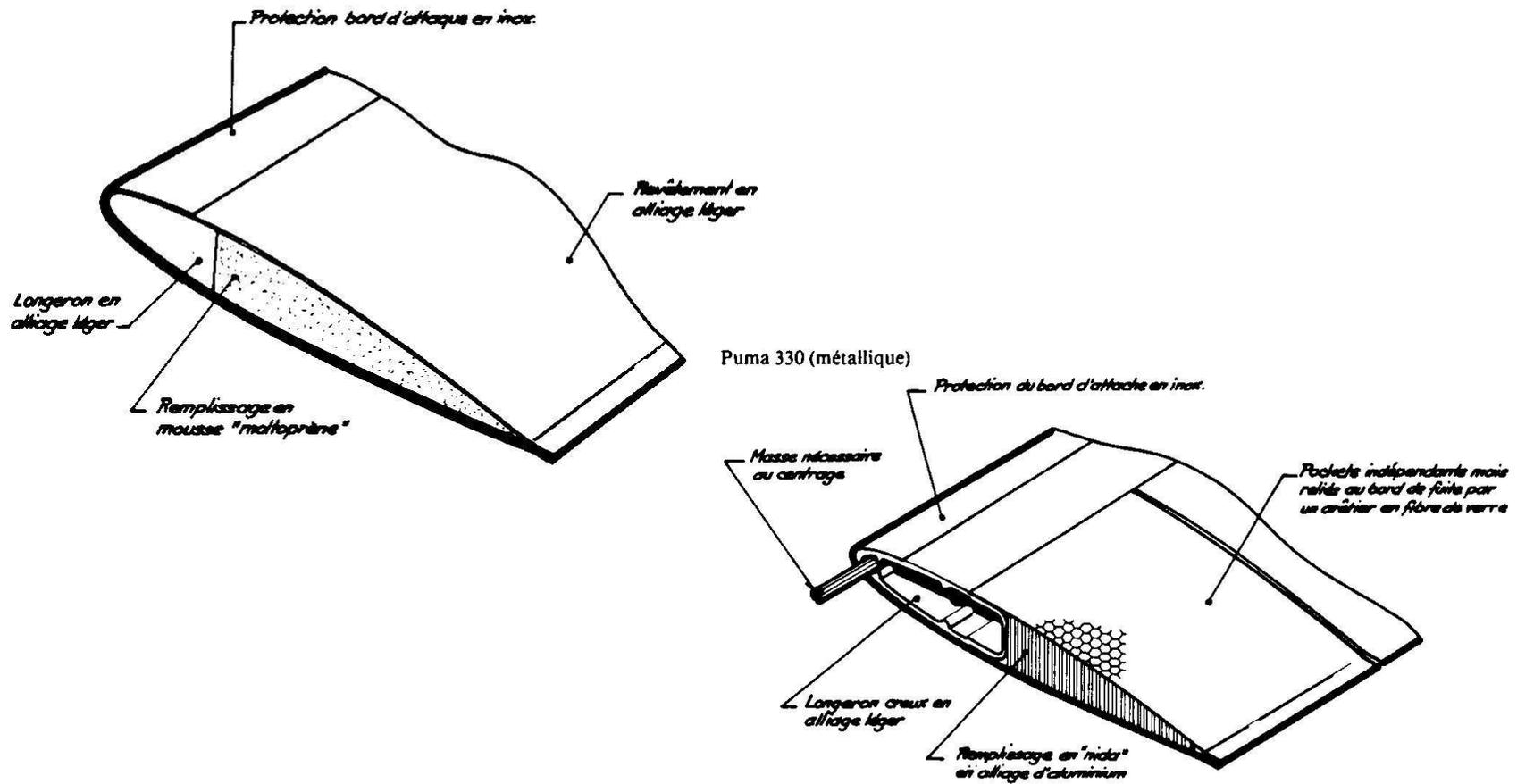
PALAS EN HELICÓPTEROS EN USO

- En este apartado simplemente mostraremos algunos ejemplos de los diseños elegidos por diversos fabricantes.



PALAS EN HELICÓPTEROS EN USO

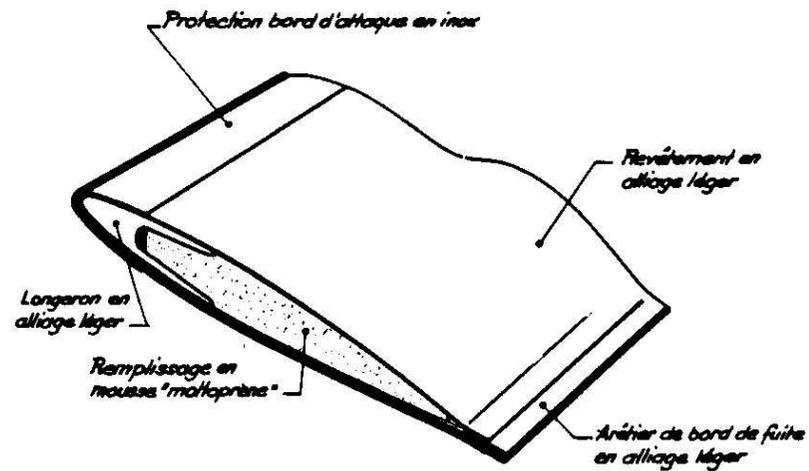
Alouette II



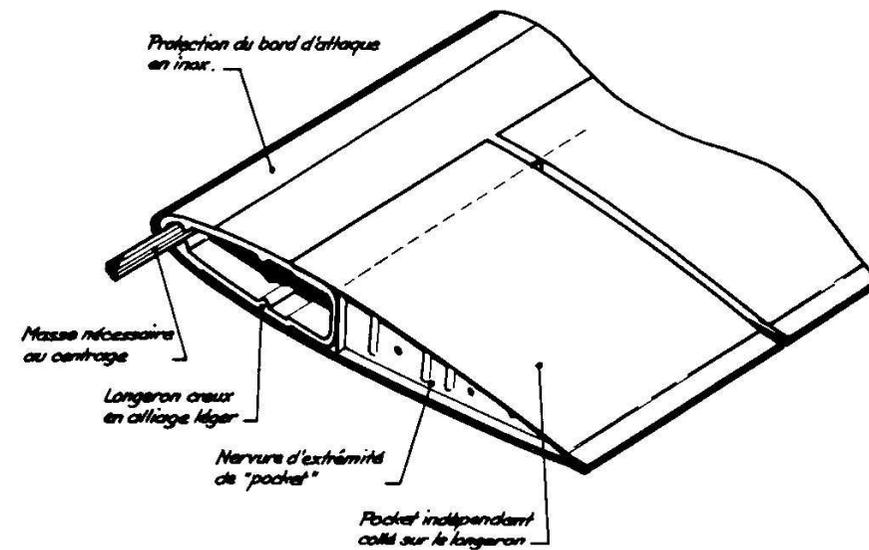


PALAS EN HELICÓPTEROS EN USO

Alouette III

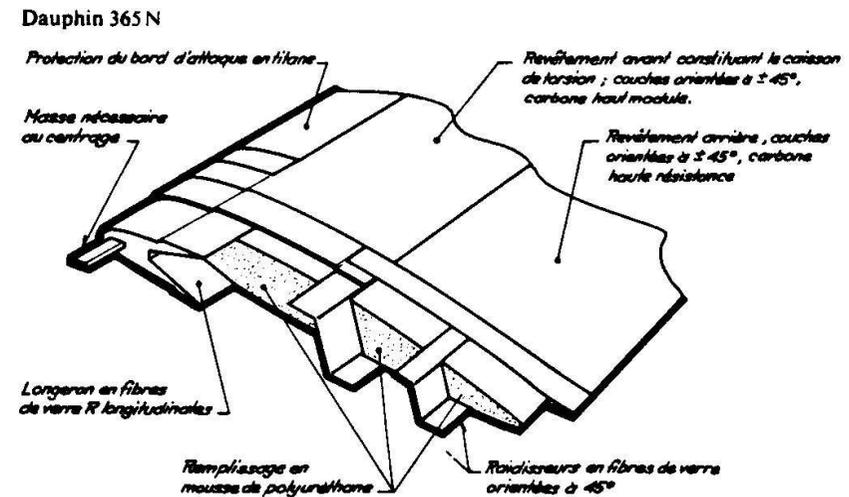
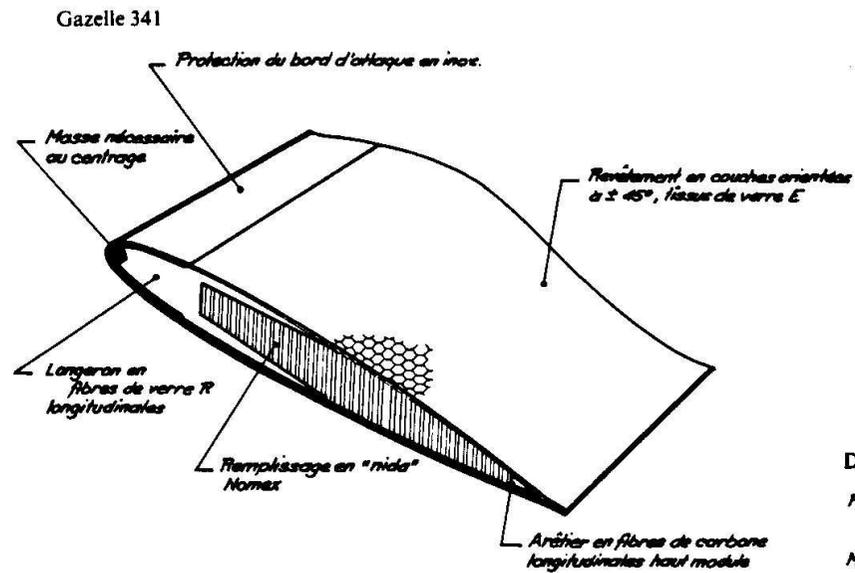


Super Frelon 321 (métallique)





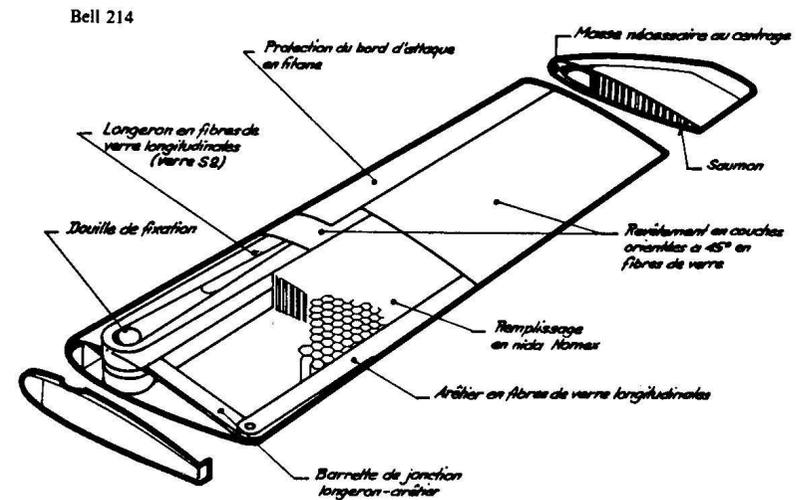
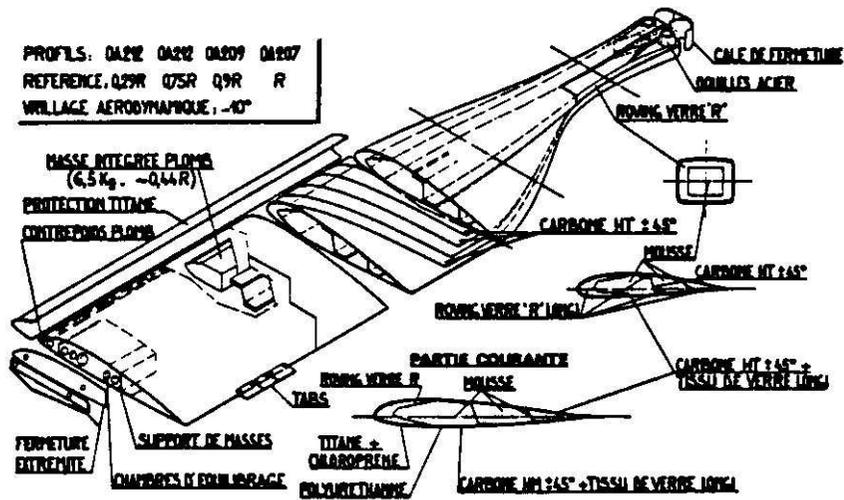
PALAS EN HELICÓPTEROS EN USO





PALAS EN HELICÓPTEROS EN USO

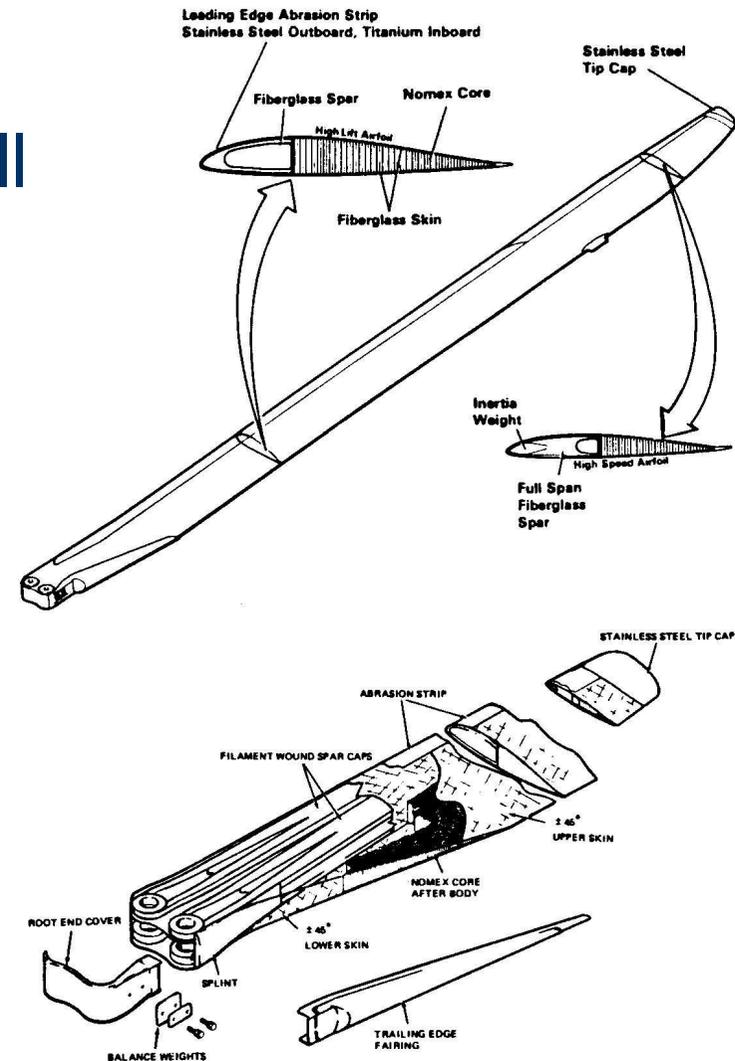
SA 365N - Pale composite





PALAS EN HELICÓPTEROS EN USO

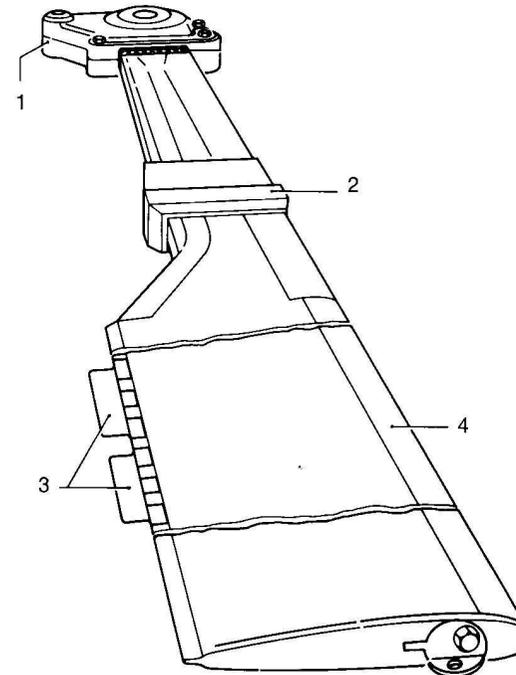
- En la figura 12-6 se muestra la pala del Bell 412.





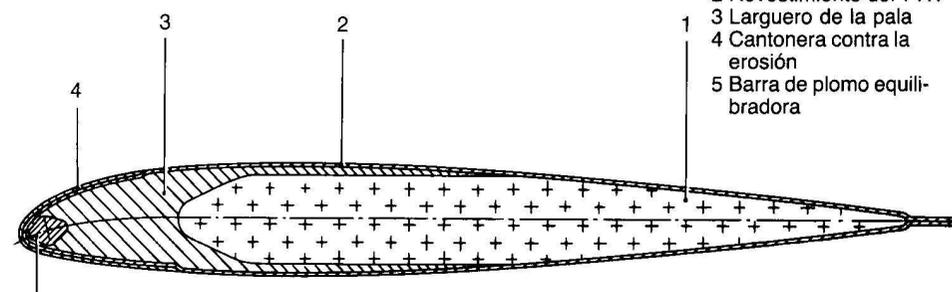
PALAS EN HELICÓPTEROS EN USO

- La pala del BO 105 podemos analizarla en la figura 12-7.



Pala del rotor principal

- 1 Pieza de protección de la raíz de la pala
- 2 Manguito
- 3 Aletas de compensación dinámica
- 4 Cantonera contra la erosión



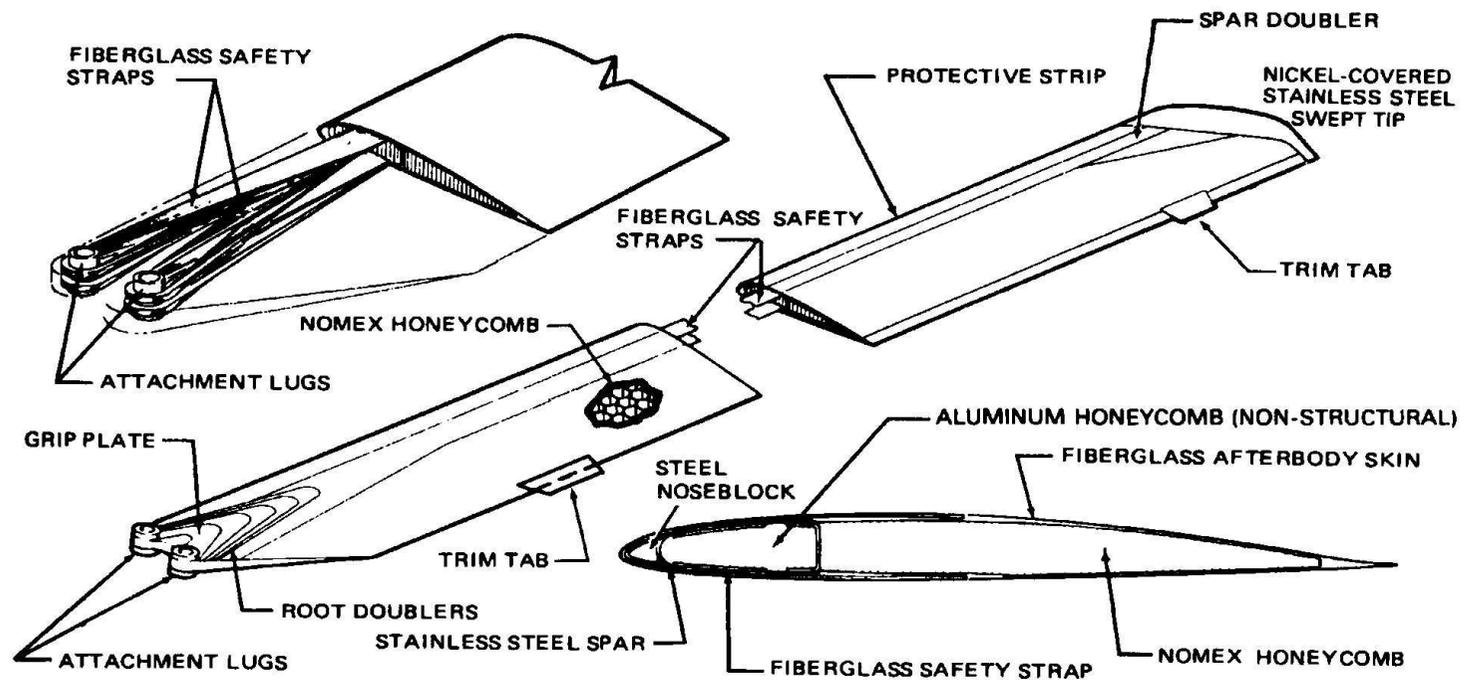
Sección de la pala

- 1 Relleno de espuma rígida
- 2 Revestimiento der PRV
- 3 Larguero de la pala
- 4 Cantonera contra la erosión
- 5 Barra de plomo equilibradora



PALAS EN HELICÓPTEROS EN USO

- La pala del Bell 230 en la figura 12-8.

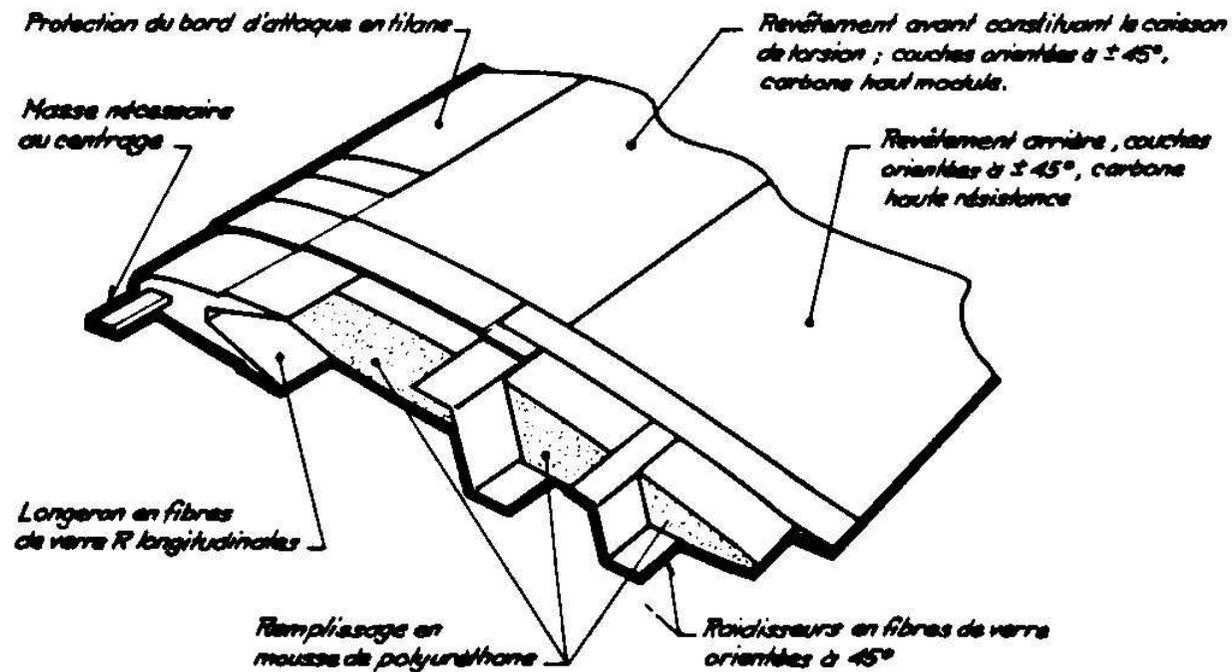




PALAS EN HELICÓPTEROS EN USO

- Incluimos un ejemplo de pala metálica (12-9).

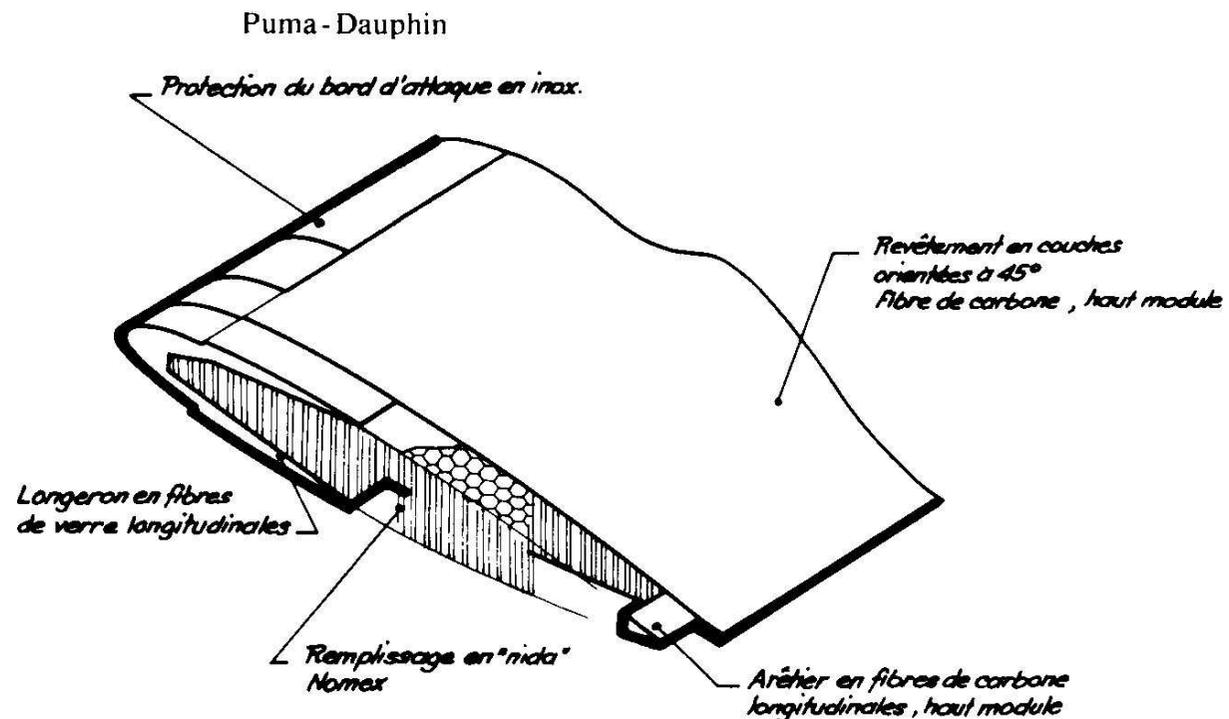
Dauphin 365 N





PALAS EN HELICÓPTEROS EN USO

- Pala en materiales compuestos (12-10).





Bibliografía

- M.A. Barcala Montejano y Ángel A. Rodríguez Sevillano. *Helicópteros. Teoría y Descriptiva*. Sección de Publicaciones E.U.I.T. Aeronáutica. Fundación General U.P.M.
- Alastair K. Cooke, Eric W.H. Fitzpatrick. *Helicopter Test and Evaluation*. Blackwell Science.
- A.R.S. Bramwell, George Done, David Balmford. *Bramwell's Helicopter Dynamics*. Butterwoth Heinemann, 2 edition 2001.
- J. Gordon Leishman. *Principles of Helicopter Aerodynamics*. Cambridge University Press, 2000.
- J. Seddon, Simon Newman. *Basic Helicopter Aerodynamics*. Blackwell Science, second edition 2002.
- John Watkinson. *The Art of the Helicopter*. Elsevier Butterwoth Heinemann, 2004.