TERMINOLOGÍA 3

GENERALIDADES 4

PERFILES 4

SECCIONES DE UN PERFIL 4

ÁNGULO DE ATAQUE Y ÁNGULO DE INCIDENCIA 5

ÁNGULO DE ATAQUE 5
ÁNGULO DE INCIDENCIA 5

VIENTO RELATIVO 7

FUERZA AERODINÁMICA 9

RESISTENCIA 10

VELOCIDAD DEL ROTOR 11

DISIMETRÍA DE LA SUSTENTACIÓN 12

ROTORES SEMIRÍGIDOS Y RÍGIDOS 13

DISIMETRÍA DE LA SUSTENTACIÓN EN EL ROTOR DE COLA 14

FUERZA CENTRÍFUGA 14

PRECESIÓN GIROSCÓPICA 16

EL VUELO ESTACIONARIO 16

SUSTENTACIÓN POR TRANSLACIÓN 18

PERDIDA EN LA PALA QUE RETROCEDE 19

FLAPEO - FLAPPING 21

TORQUE O PAR MOTOR 23

ROTOR DE COLA 24
CONTROL DE RUMBO 24
TENDENCIA A LA TRANSLACION LATERAL 24

FLUJO DE AIRE TRANSVERSAL 24

AUTORROTACIÓN 26

ASENTAMIENTO CON POTENCIA 31

EFECTO SUELO 33

TERMINOLOGÍA

Los términos comunes usados para describir los sistemas del rotor y sus componentes están listados aquí. Aunque existen algunas variaciones en los sistemas entre las diferentes aeronaves, los términos mostrados en este sitio son aceptados por la mayoría de los constructores. En algunos casos se respetan los términos en Ingles debido a que son más conocidos en esa forma que su traducción al castellano. El sistema mostrado en la siguiente figura corresponde a un sistema de rotor totalmente

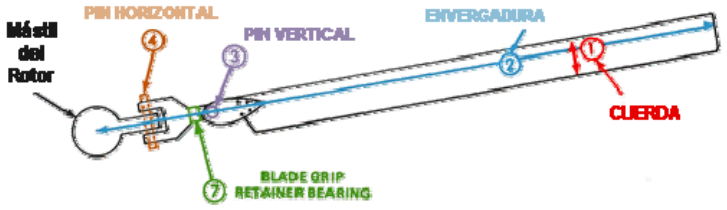


Figura 2-11. ROTOR TOTALMENTE ARTICULADO

articulado:
La siguiente figura muestra un rotor semi-rígido, que como podrán notar no tiene un pin horizontal ni un pin vertical. En su lugar, el rotor se balancea por intermedio del cojinete de trunnion que está conectado al mástil del rotor principal.

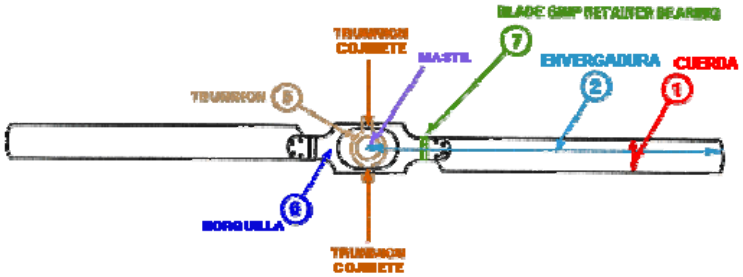


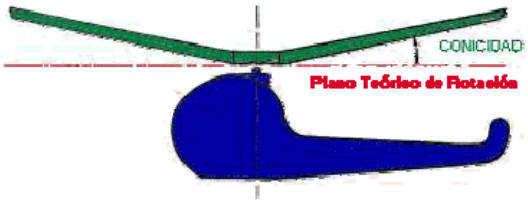
Figura 2-12. ROTOR SEMIRÍGIDO

1. CUERDA: Es la línea recta que une el borde de ataque con el borde de fuga. Es una dimensión característica del perfil.
2. ENVERGADURA: Es la distancia de punta a punta del ala (o pala), independientemente de la forma que tenga.
3. PIN VERTICAL: (Vertical hinge pin): Es el eje de pivote que permite el adelantamiento (o retroceso) de la pala independientemente de las demás palas.
4. PIN HORIZONTAL:(Horizontal hinge pin): Es el eje que permite el pivote hacia arriba o hacia abajo de las palas (flapeo), independientemente de las demás palas.
5. TRUNNION: Es el elemento que permite el "flapeo" de las palas.
6. HORQUILLA (YOKE): Es el elemento estructural al cual las palas van fijadas y al cual van ligadas al mástil a través del trunnion y al cojinete del trunnion.
7. BLADE GRIP RETAINER BEARING: Es el cojinete que permite la rotación de las palas sobre su eje longitudinal para permitir el cambio de paso.
8. TORSIÓN DE LA PALA (BLADE TWIST): Es una característica de construcción de las palas para que el ángulo de incidencia en la punta sea menor que en la raíz. Esta torsión de la pala ayuda a

mantener la sustentación a lo largo de la misma incrementando el ángulo de incidencia en la raíz donde la velocidad es menor.

GENERALIDADES

- CONICIDAD: La conicidad es el ángulo entre el eje longitudinal de la pala y el plano teórico de rotación.
- PLANO TEÓRICO DE ROTACIÓN: Es el plano perpendicular al eje de rotación, al nivel de la



articulación de la pala.
- PLENITUD : Es la relación entre la superficie efectiva de las palas y la superficie del disco barrido.
- CARGA DEL DISCO: Es la relación entre el peso total del helicóptero y el disco barrido. Carga disco = Weight / Sup. Disco. Kg / m

PERFILES

Un helicóptero vuela por los mismos principios que un avión, pero en el caso de los helicópteros la sustentación se logra por la rotación de las palas. Las palas son la estructura que hacen que la sustentación sea posible. Su forma produce sustentación cuando el aire pasa a través de ellas. Las palas del rotor tienen perfiles diseñados específicamente para las características del vuelo. Usualmente los diseñadores tienen un compromiso entre el mejor diseño para un perfil para lograr mejores características de vuelo y para las perfomances del helicóptero que se piensa construir.
Los perfiles se pueden dividir en dos grandes tipos: SIMÉTRICOS Y ASIMÉTRICOS. Los perfiles simétricos tienen idénticas superficies tanto en la parte superior (extrados) como en la inferior (intrados). Estos satisfacen normalmente los requerimientos de un helicóptero debido a que su Centro de Presión no varía. La variación permanece casi inalterable bajo los diferentes ángulos de ataque, ofreciendo la mejor relación sustentación/resistencia para las diferentes velocidades de la raíz y de la punta de pala. Sin embargo un perfil simétrico produce menos sustentación que uno asimétrico, teniendo también no deseables características de pérdida. Por otra parte las palas del rotor deben adaptarse a un ancho rango de velocidades desde la raíz hasta la punta, siendo el perfil simétrico perfectamente adaptable a estas condiciones, además de tener un bajo costo y fácil construcción con respecto al perfil asimétrico.
Los perfiles asimétricos tienen una gran variedad de diseños, siendo usados por ejemplo en algunos helicópteros como el CH-47 ó el OH-58, y están siendo utilizados en otros nuevos proyectos. Las ventajas de estos perfiles, en contrapartida de los simétricos, es su mayor capacidad de generar sustentación y mejores prestaciones ante la entrada en pérdida. Anteriormente no eran utilizados debido al movimiento de su centro de presión, pero debido a los nuevos materiales de construcción de palas son tenidos cada vez más en cuenta.

SECCIONES DE UN PERFIL
En la siguiente figura usted encontrará los términos utilizados en un perfil.

PERFILES. TERMINOLOGÍA

1. *LINEA DE LA CUERDA:* Es la línea recta que pasa por el borde de ataque y por el borde de fuga.
2. *CUERDA:* Es la línea recta que une el borde de ataque con el borde de fuga. Es una dimensión característica del perfil.
3. *LÍNEA DE CURVATURA MEDIA:* Línea equidistante entre el extrados y el intrados. Esta línea "fija" la curvatura del perfil. Si la línea de curvatura media "cae" sobre la cuerda (como en la figura) se dice que la curvatura es positiva, si cae por debajo, negativa, y si va por debajo y por arriba, doble curvatura.
4. *ORDENADA MÁXIMA:* Es la máxima distancia entre la línea de curvatura media y la cuerda del perfil. El valor suele darse en % de la cuerda.
5. *ESPESOR MÁXIMO Y POSICIÓN:* Son dos características importantes, que se expresan en % de la cuerda. El valor varía desde un 3 % en los perfiles delgados hasta un 18 % en los más gruesos.
6. *RADIO DE CURVATURA DEL BORDE DE ATAQUE:* Define la forma del borde de ataque y es el radio de un círculo tangente al extrados e intrados, y con su centro situado en la línea tangente en el origen de la línea de curvatura media.

ÁNGULO DE ATAQUE Y ÁNGULO DE INCIDENCIA

ÁNGULO DE ATAQUE

Se llama ángulo de ataque, al formado entre la cuerda y la dirección de la corriente libre del aire (resultante del viento relativo). Muchas son las formas en que se puede variar el ángulo de ataque, algunas por acción del piloto y otras automáticamente por el diseño del rotor. El piloto esta habilitado a cambiar el ángulo de ataque de las palas por el movimiento del cíclico y/o del colectivo. Sin embargo, aunque estos comandos permanezcan estables, el ángulo de ataque de las palas cambiará alrededor de la circunferencia del rotor, a medida que la pala gire. Otros factores que pueden cambiar el ángulo de ataque son por ejemplo: flapeo de las palas por turbulencia o flexión de las mismas.

ÁNGULO DE ATAQUE

ÁNGULO DE INCIDENCIA

El ángulo de ataque no debe ser confundido con el ángulo de incidencia. El ángulo de incidencia es el formado entre la línea de la cuerda y el plano de rotación del rotor. Este es un ángulo mecánico más que un ángulo aerodinámico como el ángulo de ataque. En ausencia de un flujo inducido de aire, los dos ángulos serán los mismos.

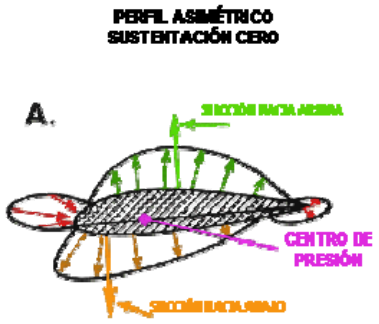
ÁNGULO DE INCIDENCIA

DISTRIBUCIÓN DE PRESIONES

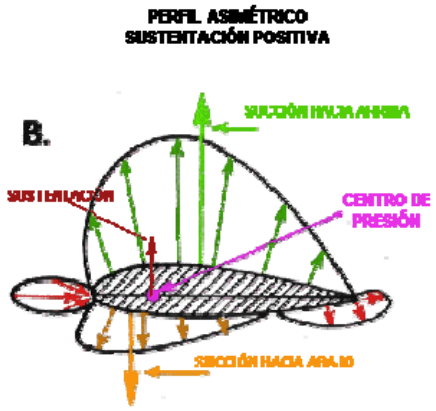
El aumento de la velocidad del aire sobre el extrados de un perfil, con respecto a la velocidad del aire en el intrados, genera presiones, tanto en uno como en otro lado. La diferencia entre estas presiones (si la presión en el extrados es mayor) genera una resultante a la que llamamos sustentación.

La distribución de las presiones sobre un perfil será explicada en este capitulo. Si observan la figura siguiente (perfil asimétrico), notaran que las presiones resultantes sobre el extrados generan una fuerza hacia arriba tanto como las presiones en el intrados otra de la misma magnitud hacia abajo, no obteniéndose sustentación.

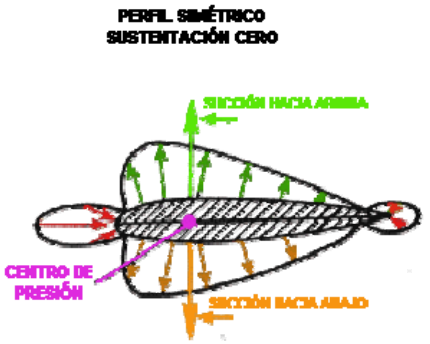
Cuando el ángulo de ataque es incrementado las presiones en el extrados son superiores a las del



intrados, obteniéndose una fuerza resultante llamada sustentación. El punto donde se puede considerar aplicada esa fuerza se denomina centro de presión.

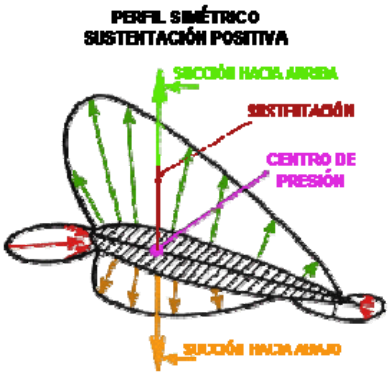


Este Centro de presión varia (perfiles asimétricos) cuando el ángulo de ataque varía. Este indeseable cambio del centro de presión en estos perfiles debe ser compensado cuando se lo utiliza en los rotores



de los helicópteros. La distribución de las presiones es diferente en los perfiles simétricos.

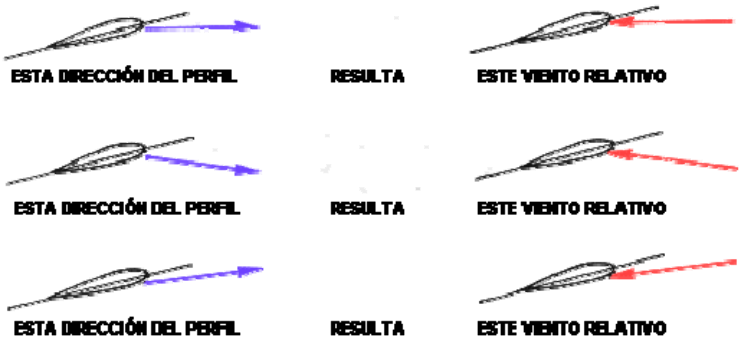
La distribución de las presiones, como puede observarse en la figura de arriba, es similar tanto arriba como abajo del perfil (ángulo de ataque cero), y las resultantes de ambas presiones son iguales y aplicadas en el mismo punto.



Con ángulo de ataque positivo las presiones en el extrados del perfil son superiores a las del intrados obteniéndose una resultante total hacia arriba, denominada sustentación. Nótese que los vectores de las resultantes de las diferentes presiones (hacia arriba y hacia abajo) permanecen en el mismo lugar, sin cambios con respecto a los perfiles asimétricos. Esta deseable característica de los perfiles simétricos es la apreciada en los rotores de helicópteros, donde el ángulo de ataque cambia en cada revolución del rotor.

VIENTO RELATIVO

El conocimiento y significado del Viento Relativo es esencial para el entendimiento de la aerodinámica

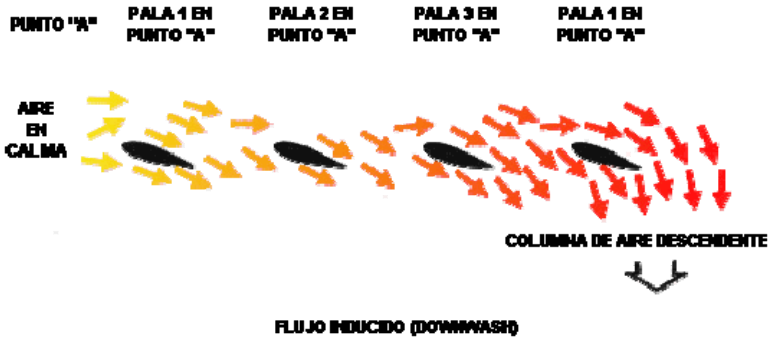


VIENTO RELATIVO

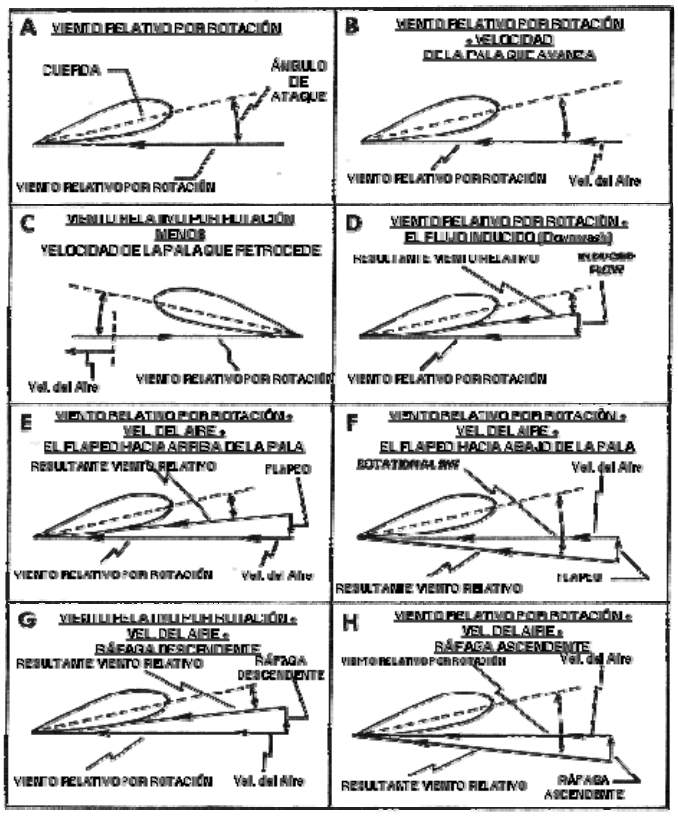
sobre las alas rotativas. El Viento Relativo es definido como el flujo de aire "relativo" que ataca a un perfil.

El viento relativo se incrementa si la velocidad del perfil es incrementada. Como ejemplo, consideren una persona sentada dentro de un automóvil con su mano extendida fuera de la ventanilla, en un día sin viento. No hay flujo de aire debido a que el automóvil no se está moviendo, sin embargo si ahora el automóvil esta desplazándose a 100 Km/h, el flujo de aire sobre la mano estará desplazándose a 100 Km/h. Ahora si ustedes mueven la mano hacia adelante (digamos a unos 10Km/h) el viento relativo será de 110 Km/h y si lo hacen hacia atrás será de 90 Km/h.
En un helicóptero, con un día sin viento y en vuelo estacionario, el viento relativo rotacional será creado por la rotación de las palas. Como el rotor está moviéndose horizontalmente, el efecto es desplazar algo de aire hacia abajo (downwash). El movimiento de las palas a través del mismo curso dan un punto en rápida sucesión (un rotor con tres palas girando a 320 RPM, tendrá en el mismo punto un pasaje de palas de 16 veces por segundo).

El siguiente dibujo muestra como el aire calmo es cambiado a una columna de aire descendente por acción de las palas del rotor.



Este flujo de aire es llamado Flujo Inducido (Downwash). Este flujo de aire hacia abajo es aún inducido en condiciones de viento. El tránsito del flujo de aire a través del disco del rotor modifica el viento relativo rotacional. El flujo de aire de la rotación, modificado por el flujo inducido, produce la Resultante del Viento Relativo. En la siguiente ilustración, el ángulo de ataque es reducido por el flujo inducido, causando sobre el perfil la una sustentación menor.

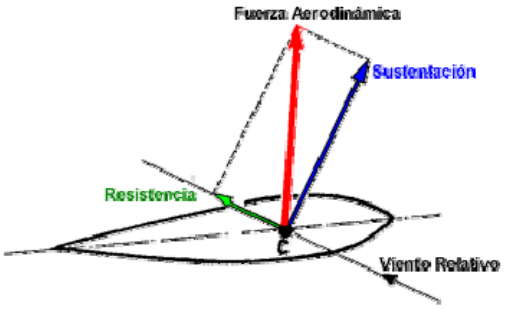


COMPONENTES DEL VIENTO RELATIVO

Cuando el helicóptero tiene movimiento horizontal, la resultante del viento relativo es además cambiada por la velocidad del helicóptero. Además, se debe tener en cuenta que también cambia, si el perfil que es estudiado, se encuentra en ese momento en la pala que avanza o en la que retrocede, sumando o restando el viento relativo. El flujo inducido también sufre variaciones con la velocidad de desplazamiento.

FUERZA AERODINÁMICA

Una fuerza aerodinámica es generada cuando una corriente de aire fluye sobre y por debajo de un perfil. El punto donde esta corriente se divide se lo denomina "punto de impacto". Ahora bien, ¿A qué llamamos fuerza aerodinámica?. Fuerza aerodinámica es la resultante de dos fuerzas que desempeñan un papel importantisimo, estas son, la sustentación y la resistencia al avance.



DESCOMPOSICIÓN DE LA FUERZA AERODINÁMICA

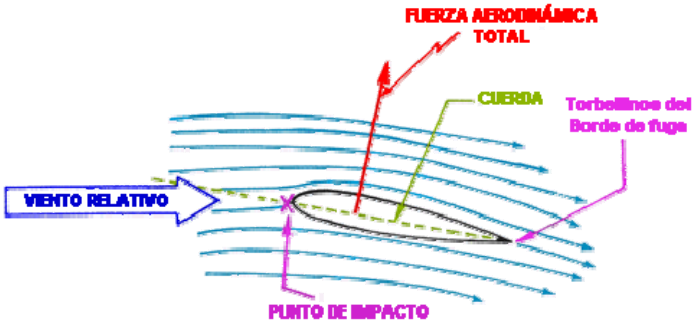


Figura 2.18. FLUJO SOBRE UN PLANO AERODINÁMICO

Una presión muy alta se genera en el punto de impacto. Normalmente el área de alta presión se localiza en la porción más baja del perfil, dependiendo del ángulo de ataque. Esta área de alta presión contribuye a las fuerzas producidas por la pala. La figura nos muestra también, líneas que ilustran como el flujo de aire se desplaza por arriba y por abajo del perfil. Note que el flujo de aire es deflectado hacia abajo, y si recordamos la tercera Ley de Newton, "cada acción tiene una reacción opuesta", se generará una fuerza hacia arriba también. Esta fuerza se suma a la fuerza total aerodinámica. A muy bajos ángulos de ataque esta fuerza puede ser muy baja o nula. La forma del perfil genera baja presión sobre el mismo de acuerdo al Principio de Bernoulli. La diferencia de presión entre la parte superior del perfil (extrados) y la inferior (intrados) es bastante pequeña, alrededor del 1 %, pero aplicada a lo largo de la pala de un rotor es bastante significativa.

La fuerza total aerodinámica, algunas veces llamada fuerza resultante, como ya dijimos, puede ser dividida en dos componentes, que son la sustentación y la resistencia. La sustentación actúa en forma perpendicular al viento relativo. La resistencia es la fuerza que se opone al movimiento de un cuerpo (perfil) en el aire.

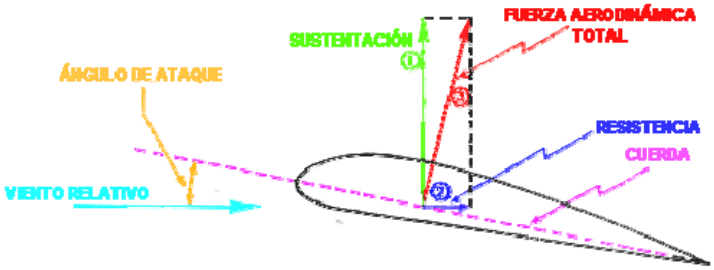


Figura 2.19. FUERZAS ACTUANTES SOBRE UN PLANO AERODINÁMICO

Muchos factores contribuyen a la sustentación total generada por un perfil. El incremento de velocidad causa un aumento de sustentación debido a la diferencia de presiones entre el extrados y el intrados. La sustentación se incrementa con el cuadrado de la velocidad, así, una pala con una velocidad de 500 Kts. genera 4 veces más sustentación que una que vuele a 250 Kts. La sustentación varía con la superficie que tenga la pala. Un área de 100 pies cuadrados generará el doble de sustentación que otra de 50. Por supuesto, el ángulo de ataque tiene su importancia en la generación de sustentación como así también la densidad del aire. Normalmente, un aumento de la sustentación generará un aumento de la resistencia. Por lo tanto, cuando se diseña un perfil se toman en cuenta todos estos factores y se lo realiza para que tenga el mejor desempeño en el rango de velocidades en que se vaya a mover.

RESISTENCIA

La Resistencia es la fuerza que se opone al movimiento del helicóptero en el aire. La resistencia total que se opone al movimiento de una aeronave es la suma de: La resistencia del perfil, la resistencia inducida y la resistencia parásita. La resistencia total es primariamente función de la velocidad. La velocidad que teóricamente produce la resistencia total más baja determina la velocidad de mejor rango de ascenso, el mínimo rango de descenso para la autorrotación y la máxima velocidad de mejor autonomía.
La siguiente figura nos muestra un cuadro de las diferentes resistencias en función de la velocidad.

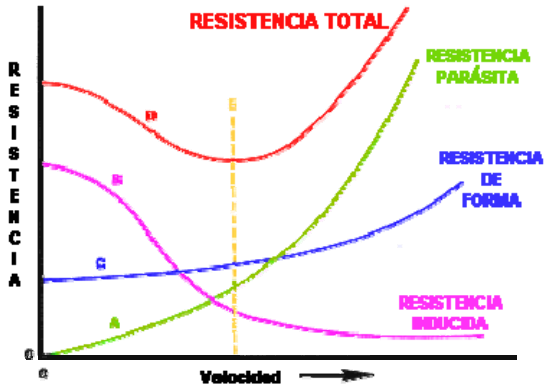


Figura 2-23. GRÁFICO RESISTENCIA/VELOCIDAD

La resistencia al avance es la provocada por el perfil con su fricción con el aire. Esta no cambia significativamente con la variación del ángulo de ataque, pero se incrementa moderadamente con el aumento de la velocidad.
La resistencia inducida es la resistencia producida como resultado de la producción de sustentación. Altos ángulos de ataque, que producen más sustentación, producen alta resistencia inducida. En las alas rotativas, al aumentar la velocidad de translación del helicóptero, la resistencia inducida disminuye. La resistencia inducida es una de las fuerzas aerodinámicas opuestas a la sustentación.
La resistencia parásita es la producida por todos aquellos componentes no generadores de sustentación. La curva "A" en el diagrama nos muestra la resistencia parásita, que es muy baja a bajas velocidades y aumenta con la velocidad. La curva "B" nos muestra la resistencia inducida que decrece con la velocidad. En estacionario esta resistencia es muy alta. La curva "C" es la resistencia del perfil o de forma aumentando muy poco con el aumento de la velocidad. La curva "D" muestra la resistencia total que es la suma de las otra tres. Ahora si usted puede identificar el punto mas bajo de esta curva, y lo transporta sobre el eje de las velocidades, obtendrá una velocidad, la cual es: la de mayor autonomía, la de mejor rango de ascenso y la de mínimo rango de descenso en autorrotación.

VELOCIDAD DEL ROTOR

Durante el vuelo estacionario, el flujo de aire sobre las palas es producido por el giro del rotor del helicóptero. La siguiente figura nos muestra un típico sistema de rotor.

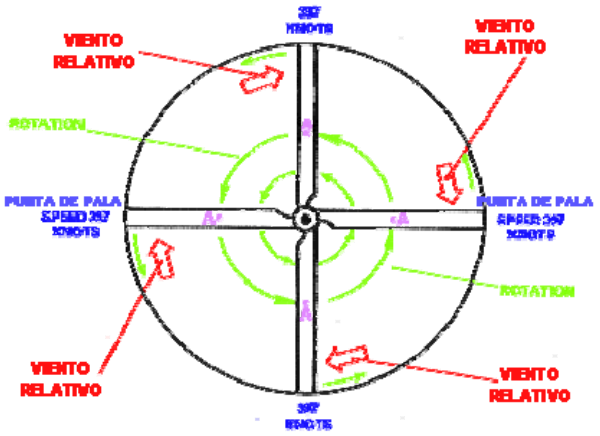


Figura 2-34. VELOCIDAD DE LAS PALAS EN ESTACIONARIO

Como notarán, la velocidad cercana a la raíz es menor que en la punta (¡gran deducción!), ahora, si tomamos un punto medio entre la raíz y la puntera de pala (punto A), obtendremos una velocidad superior a la de la raíz pero menor a la de la puntera (¡otra gran deducción!), como verán la velocidad aumenta a medida que nos alejamos del centro (piensen que esto también lo leen los chicos).
Pero (creo que los chicos se van a marear un poco ahora) si piensan que la sustentación varia al cuadrado de la velocidad, (recuerden la fórmula de la sustentación -1/2þ*V2*Cl*S), verán que cuando la velocidad aumenta al doble, la sustentación se verá aumentada cuatro veces. Esto significa que en el punto "A" tendremos solo 1/4 parte de la sustentación total de la pala (asumiendo que el ángulo de ataque y la superficie de la pala son los mismos a lo largo de ella). Por eso las palas de los helicópteros son construidas con una "Torsión" (torsión "Twist"), diseñándolas con un ángulo de ataque mayor en la raíz que en las puntas. Logrando con esto una distribución de la sustentación mas uniforme desde la raíz hacia la puntera. La siguiente figura compara la distribución de la sustentación en una pala con

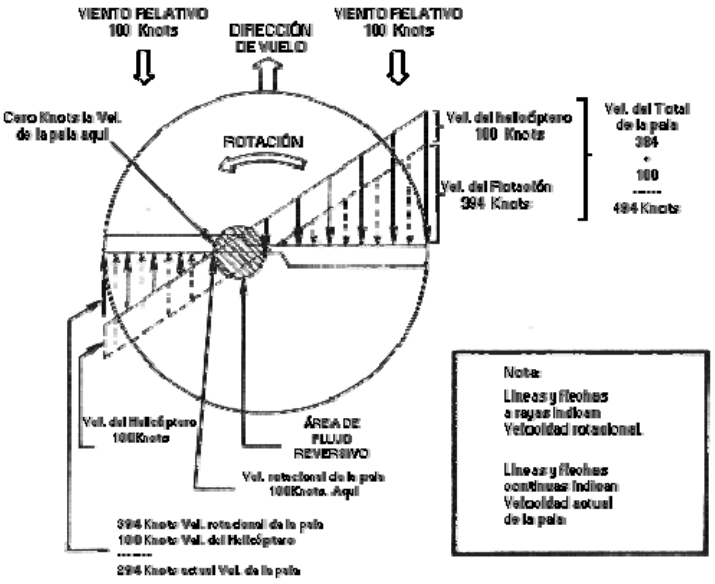
Figura 2-35. DISTRIBUCIÓN DE LA SUSTENTACIÓN SOBRE PALAS CON Y SIN TORSIÓN

torsión a otra sin ella.

Noten que las palas con torsión generan más sustentación cerca de la raíz y menos en las puntas que las palas sin torsión.

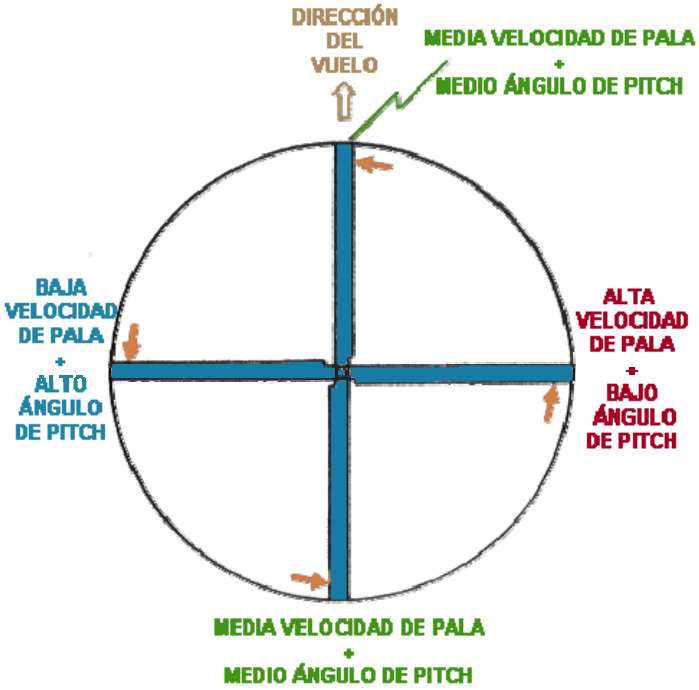
DISIMETRÍA DE LA SUSTENTACIÓN

La disimetría de la sustentación sobre el rotor de un helicóptero se debe a la diferencia de sustentación entre la mitad del rotor que avanza y la mitad que retrocede.
La pala que pasa por el rotor de cola y avanza hacia adelante por el lado derecho del helicóptero (tomamos como ejemplo un giro en contra de las agujas del reloj, helicópteros standard, no así los helicópteros franceses) tiene un incremento de velocidad la cual alcanza su máxima a los 3/4 del giro. Luego, a partir de ese lugar hacia la nariz del helicóptero la pala va perdiendo velocidad. A partir de aquí la pala va perdiendo velocidad obteniendo la mínima a los 90º a la izquierda y luego comienza nuevamente a ganar velocidad.
La siguiente figura muestra las diferentes velocidades que alcanza la pala a lo largo de una revolución. Note también la parte circular sombreada llamada "Área de Flujo Reversivo".



DISIMETRÍA DE LA SUSTENTACIÓN

La velocidad en el extremo de esta zona es de cero nudos, dentro de esta zona el aire se mueve desde el borde de fuga hacia el borde de ataque. Desde el extremo de esa zona hacia la punta de la pala la velocidad aumenta hasta 294 Knots (en el ejemplo).
A una velocidad de 100 Kts. del helicóptero, como en el ejemplo, existe una diferencia de 200 Kts. entre la pala que avanza y la que retrocede. Puesto que la sustentación se incrementa con el cuadrado de la velocidad, una potencial variación de la sustentación existe entre la zona del rotor que avanza con la zona que retrocede. Esta diferencia de sustentación debe ser controlada sino un helicóptero sería incontrolable (volcaría hacia la izquierda, como lo comprobó prácticamente de la Cierva).
Para comparar la sustentación de las dos zonas debemos usar la formula de la sustentación (1/2þ*V2*Cl*S). En vuelo, dos factores de la ecuación, densidad (þ) y la superficie de la pala(S) permanecen constantes tanto en la pala que avanza como en la que retrocede. Los únicos factores que varían son la velocidad y el ángulo de ataque, factores que deben compensarse entre ellos para derrotar la disimetría de la sustentación.
Dos factores, las RPM del rotor y la velocidad del helicóptero, controlan la velocidad de la pala en vuelo hacia adelante (por ahora pensemos solo en el vuelo hacia adelante), ambos factores variables en alguna proporción, debiendo mantenerse en ciertos valores operativos.
La siguiente figura muestra la relación que existe entre el ángulo de pitch de la pala y la velocidad de la misma, en vuelo hacia delante (pág. Siguiente):

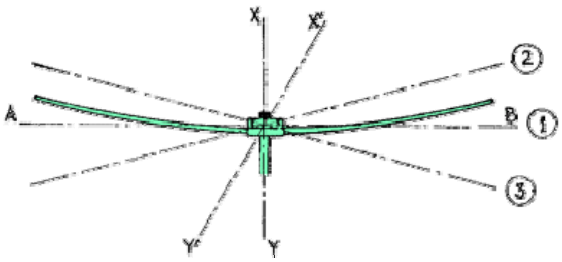


Note que el ángulo de pitch es más bajo sobre el lado del disco que avanza para compensar el aumento de la velocidad de la pala sobre este sector y por el contrario es aumentado el ángulo de pitch sobre el lado con menor velocidad de la pala. Estos cambios se realizan en forma automática y fuera del control del piloto (por supuesto), por un mecanismo muy simple que permite a la pala subir o bajar ("flapear") libremente. Trataré de explicar un poco más esto: cuando la pala comienza a ganar velocidad (parte derecha del dibujo) comienza a tener más sustentación, al tener más sustentación la pala va a subir (me siguen?), al colocársele un dispositivo que permita que la pala suba (pin horizontal), su viento relativo hace que el ángulo de ataque disminuya y por lo tanto la sustentación disminuye también. autoregulandose en todo el viaje alrededor de su eje. Por el contrario en la parte izquierda del dibujo (claro, también en el rotor) con la disminución de la velocidad y la consecuente disminución de la sustentación la pala va a bajar, aumentando su ángulo, y aumentando luego la sustentación. no es tan difícil). Esta articulación se la conoce como Articulación de batimiento ó flapeo.
Todo esto es solo para que el helicóptero no vuelque hacia su izquierda (nada más ni nada menos), y el primero en ponerlo en práctica fue Juan de la Cierva en sus primeros autogiros (en realidad, los primeros se le estampaban contra el piso a causa de la disimetría de la sustentación).
Hasta ahora los fui llevando por el camino que yo quería, pero todo esto funciona para los rotores totalmente articulados. ¿Se preguntaron que otras maneras existen para contrarrestar la disimetría de la sustentación?. ¡Sí!, existen otras. Vamos a tratar de verlas y explicarlas lo mejor posible.

ROTORES SEMIRÍGIDOS Y RÍGIDOS

En los rotores semirígidos las palas no están articuladas en el buje, es el conjunto el que puede inclinarse en su conjunto por medio de una junta universal que une al buje con el eje(por supuesto, los semirígidos tienen solo dos palas).
Si piensan en este tipo de conjunto (les pongo una figura abajo para que el pensamiento sea más profundo), verán que cuando una pala sube la otra baja, compensando de esta manera la diferencia de sustentación en cada lado (sí, las palas están enfrentadas).

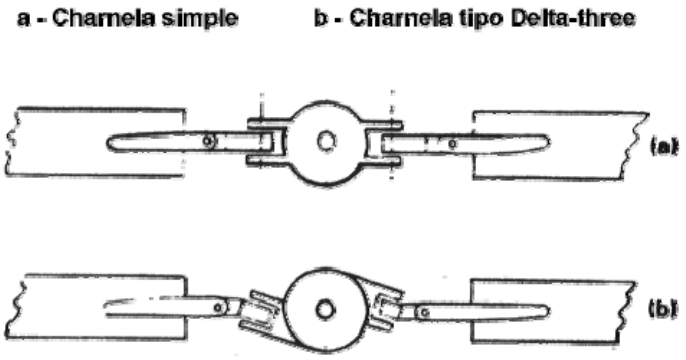
En un rotor rígido (como el BO-105) las palas al estar construidas con materiales compuestos absorben ellas mismas y se flexionan permitiendo corregir la disimetría de la sustentación.



DISIMETRÍA DE LA SUSTENTACIÓN EN EL ROTOR DE COLA

El rotor de cola también sufre los efectos de la disimetría de la sustentación, debido a que también tiene una pala que avanza y otra que retrocede con respecto a la dirección hacia adelante del helicóptero. , ¿Esto lo habían pensado?.

La corrección a esto es similar a la del rotor principal, con una Articulación de flapeo o batimiento. Existen dos tipos básicos de articulación, la simple y el tipo delta, que son las mostradas en la figura siguiente.

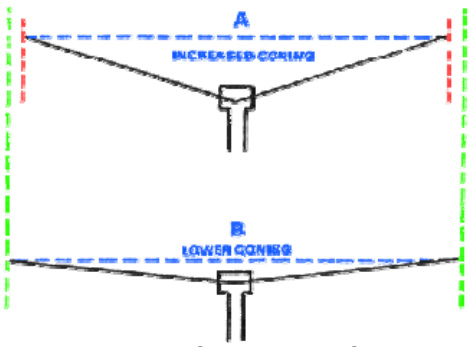


FUERZA CENTRÍFUGA

El sistema de rotor de un helicóptero depende principalmente de su rotación para generar la sustentación necesaria para el vuelo. Debido a su rotación y peso, el rotor esta sujeto a fuerzas y momentos característicos de todas las masas en rotación. Una de las fuerzas producidas es la Fuerza Centrífuga. Esta, es definida como la fuerza que tiende a que todos los cuerpos en rotación traten de alejarse de su eje.

Otra de la fuerza que se generan es la Fuerza Centrípeta. Esta es la fuerza opuesta a la centrífuga, que hace que los componentes de un sistema en rotación traten de acercarse a su eje. La rotación de las palas de un helicóptero produce una muy alta fuerza centrífuga, cargando la misma sobre el rotor y el conjunto de las palas. Imaginen que la carga sobre la raíz de la pala puede estar en el orden de las 6 a las 12 toneladas, en un helicóptero de 2 a 4 pasajeros. Helicópteros más grandes pueden experimentar, en cada pala, unas 40 toneladas sobre la raíz.

La fuerza centrífuga es una de las fuerzas dominantes en el estudio de las alas rotativas. Cuando las palas del rotor de un helicóptero no están girando, caen hacia abajo debido a su propio peso. Cuando comienza la rotación del conjunto las palas comienzan a elevarse de su posición de descanso debido a la fuerza centrifuga. A velocidad operacional, debido a su ángulo de ataque, las palas se encuentran en posición "recta", todavía no están generando sustentación. Cuando el rotor comienza a generar sustentación, las palas abandonan su posición "recta" y comienzan a generar una posición de "cono". La medida de este cono depende de las RPM, el peso total, y las fuerzas G experimentadas en el vuelo. Si las RPM permanecen constantes, el cono aumenta si, el peso total y las fuerzas G son aumentadas. También, si las RPM disminuyen, manteniendo el peso y las G constantes, el cono va a aumentar. Excesivo "cono" (coning) causa fatiga sobre las palas además de una disminución de la sustentación al



DISMINUCIÓN DE SUSTENTACIÓN
POR
DISMINUCIÓN DEL ÁREA DISCAL

disminuir el área del disco rotor.

Note que el diámetro efectivo del disco del rotor, con el coning incrementado, es menor que el otro disco sin coning. A menor diámetro de disco obtendremos menor sustentación.
La fuerza centrífuga y los efectos de la sustentación pueden ser mejor entendidos con un gráfico. Primero mire un eje de rotor y una pala rotando.

FUERZA CENTRÍFUGA

Ahora observe el mismo rotor cuando una fuerza vertical le es aplicada en la puntera de la pala.

Figura 2.32. SUSTENTACIÓN Y FUERZA CENTRÍFUGA

La fuerza aplicada es la sustentación producida cuando las palas aumentan su ángulo de ataque. La fuerza horizontal es la fuerza centrífuga generada por el rotor al girar. Debido a que la raíz de la pala está sujeta al árbol, sólo el otro extremo tiene la libertad de moverse y se obtiene una resultante en la pala como muestra la siguiente figura.

Figura 2.32. RESULTANTE DE SUSTENTACIÓN Y FUERZA CENTRÍFUGA

La posición de la pala es la resultante de dos fuerzas: la sustentación y la fuerza centrifuga.

PRECESIÓN GIROSCÓPICA

La precesión giroscópica ocurre en todos los cuerpos que giran, en los cuales, al aplicárseles una fuerza, esta se manifiesta 90º mas tarde en la dirección de la rotación. Aunque la precesión giroscópica no es una fuerza predominante en el estudio aerodinámico de las alas rotativas, esta debe ser tenida en cuenta al ser el rotor del helicóptero un cuerpo que tiene sentido rotatorio.
El siguiente diagrama muestra como afecta la precesión giroscópica al disco del rotor cuando una fuerza es aplicada en diferentes partes del mismo.

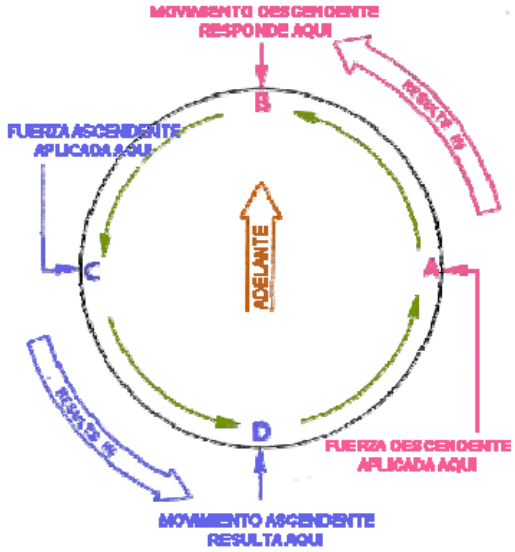


Figura 2.08. PRECESIÓN GIROSCÓPICA

Una fuerza descendente aplicada en el punto "A" resulta en un cambio descendente del rotor en el punto "B". Ahora, si aplicamos una fuerza ascendente en el punto "C" obtendremos un movimiento ascendente en el punto "D".
Esta particularidad en el disco del rotor debe ser tenida en cuenta y explica además algunos de los factores que se interrelacionan en algunas de las maniobras de un helicóptero. Por ejemplo, los helicópteros se comportan en forma diferente si realizan un giro hacia la derecha que si lo realizan hacia la izquierda. Durante un giro hacia la izquierda, el piloto debe corregir una tendencia de la nariz del helicóptero de inclinarse hacia abajo para mantener la altitud. Inversamente en un giro hacia la derecha, la precesión causa que la nariz suba y el piloto se vea en la necesidad de corregir esta acción para mantener la altitud.

EL VUELO ESTACIONARIO

Estacionario es el término aplicado cuando un helicóptero mantiene una posición constante sobre un punto seleccionado, usualmente a unos pocos metros con respecto al piso (pero no siempre, debido a que los helicópteros son capaces de mantener un estacionario a gran altitud). Para que un helicóptero se mantenga en estacionario, el rotor principal debe generar una sustentación igual al peso total del helicóptero. Las fuerzas de sustentación y peso alcanzan un equilibrio durante un vuelo estacionario.
Asumiendo una condición sin viento, las punteras de las palas deberían permanecer horizontales. Si el ángulo de ataque de las palas es incrementado mientras que su velocidad permanece constante, aumentaremos la sustentación y por lo tanto podremos ascender. Si por el contrario disminuimos el ángulo de ataque, descenderemos.

EL FLUJO DEL AIRE EN VUELO ESTACIONARIO

En estacionario, los vórtices de punta de pala (remolinos de aire en la puntera de las palas), reducen la eficiencia de la porción externa de la misma. Así mismo, los vórtices de la pala precedente afectan el desempeño de la pala siguiente. Si los vórtices generados por el pasaje de una pala permanecen por unos pocos segundos, entonces, dos palas girando a 350 RPM crearan 700 vórtices por minuto, cada

Figura 2-36. VÓRTICES DE PUNTA DE PALA EN ESTACIONARIO

uno de los cuales durando algunos segundos. Esta continua creación de nuevos vórtices e ingestión de los preexistentes es una de las causas primarias de la alta potencia necesaria para sostener un estacionario.

Durante el estacionario, el rotor mueve grandes volúmenes de aire en sentido descendente. Este proceso de "bombeo" del aire hacia abajo genera velocidades que pueden alcanzar entre 60 a 100 Kts. , dependiendo de la medida del rotor y del peso operativo del helicóptero. El modelo del flujo de aire en vuelo estacionario está representado en la siguiente figura.

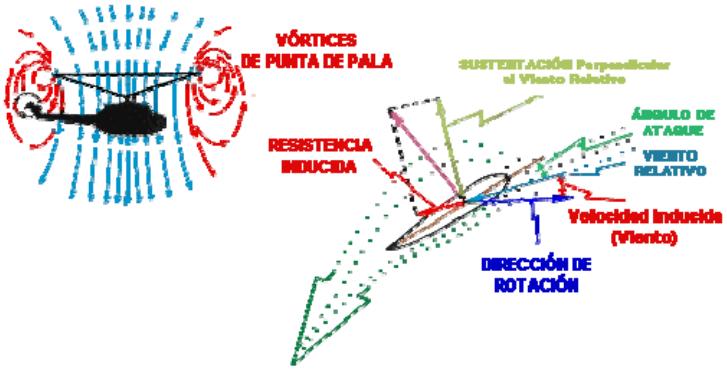


Figura 2-37. ESTACIONARIO FUERA DE EFECTO SUELO

Note como, el flujo de aire hacia abajo (flujo inducido) ha introducido otro elemento en el viento relativo, el cual altera el ángulo de ataque del perfil. Cuando no existe flujo inducido, el viento relativo es opuesto y paralelo a la trayectoria de vuelo del perfil. En el caso del vuelo estacionario, el flujo de aire descendente altera al viento relativo, cambiando el ángulo de ataque produciendo una menor fuerza de sustentación. Esta condición requiere que el piloto aumente el paso colectivo, para producir una mayor fuerza aerodinámica, y así poder sostener un vuelo estacionario. A pesar que esto incrementa la sustentación, también incrementa la resistencia inducida, y por lo tanto la potencia requerida es mayor.

SUSTENTACIÓN POR TRANSLACIÓN

La eficiencia de un rotor es aumentada con cada kilómetro de velocidad que aumente el viento que pasa a través del mismo. Después que la masa de aire ingresa al rotor, turbulencia y vórtices son dejados detrás, convirtiendo a la masa de aire más horizontal.

La siguiente figura nos muestra el formato del flujo del aire a una velocidad del helicóptero de 10/15 Kts. El flujo de aire es mucho más horizontal que en vuelo estacionario. El flujo de aire descendente esta siendo desbordado y fluye bajo la nariz del helicóptero. Alrededor de los 16/24 Kts. (dependiendo de las dimensiones del rotor y de las RPM) el rotor deja atrás a la recirculación de los viejo vórtices, comenzando a trabajar en relativo aire limpio.

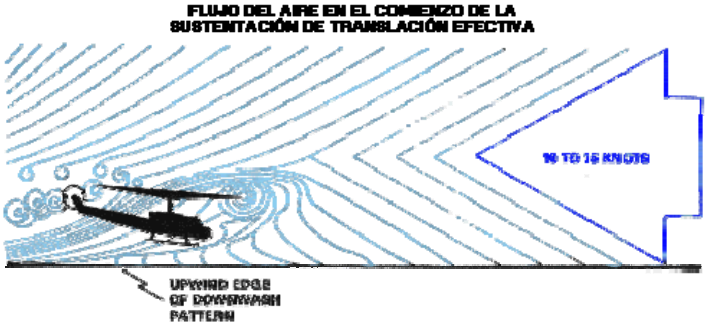


Figura 2-47. SUSTENTACIÓN TRANSLACIONAL A 10/15 KNOTS

Cuando la velocidad del helicóptero se incrementa, la sustentación por translación comienza a ser más efectiva, y causa que la nariz del helicóptero se eleve (en ingles a veces llamado blowback). Esto es causado por la combinación de los efectos de la disimetría de la sustentación y el flujo transversal. El piloto debe corregir esta actitud para compensar los efectos del blowback, debido a que si no lo realiza, el helicóptero subiría la nariz y se inclinaría hacia la derecha.

Un helicóptero con un solo rotor principal efectuando la transición de vuelo estacionario a vuelo con velocidad, logra también mayor eficiencia en el rotor de cola, debido a que este también comienza a trabajar en aire menos turbulento.

Con la eficiencia del rotor de cola, más empuje es producido. Esto causa que la nariz del helicóptero tienda a guiñar hacia la izquierda, si el rotor gira en sentido contrario a las agujas del reloj, por esto, durante un despegue con potencia constante, el piloto debe comenzar a aplicar pedal derecho para compensar la tendencia a guiñar a la izquierda.

PERDIDA EN LA PALA QUE RETROCEDE

La tendencia a la entrada en pérdida de la pala que retrocede, en vuelo hacia adelante, es la causa de la limitación de la velocidad máxima que puede desarrollar un helicóptero en el presente. Así como la pérdida limita las posibilidades de la disminución de velocidad mínima de un avión, la perdida en la pala que retrocede, limita el desarrollo de altas velocidades de los actuales helicópteros. La velocidad de la pala que retrocede es menor a medida que la velocidad del helicóptero aumenta. Sin embargo, esta parte del rotor (la izquierda) debe mantener una sustentación igual a la de la parte derecha, por lo tanto al disminuir "su" velocidad, aumentará el ángulo de ataque para seguir produciendo la misma sustentación. En algún momento de este proceso, si seguimos aumentando la velocidad del helicóptero, la pala tendrá un alto ángulo de ataque que le provocará que entre en perdida.
En vuelo hacia adelante, la "zona de no -sustentación" se correrá hacia la izquierda del centro como nos muestra la figura.

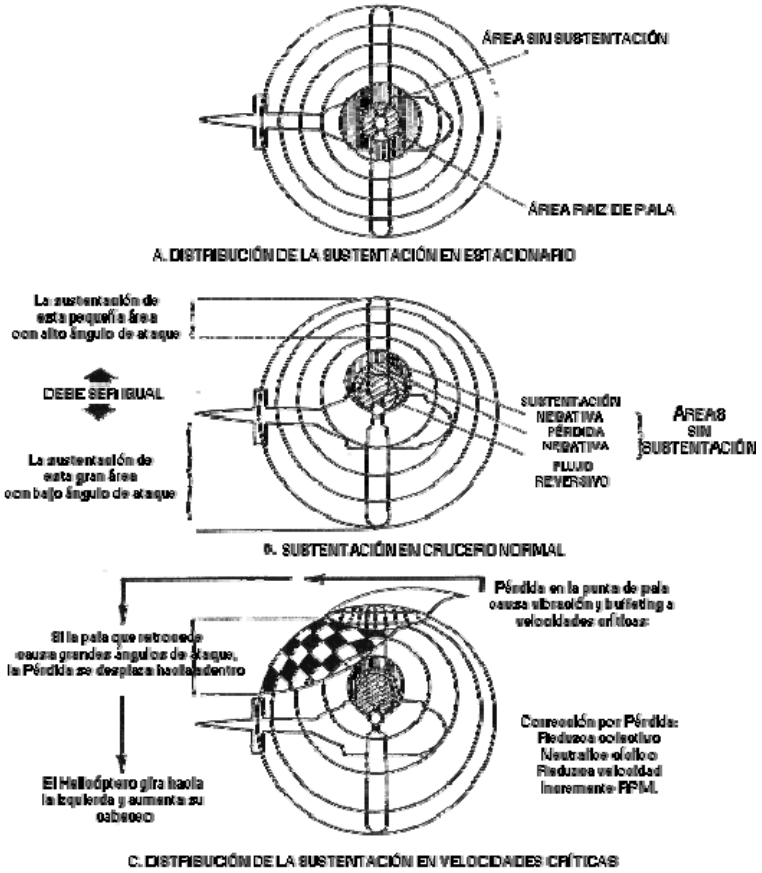
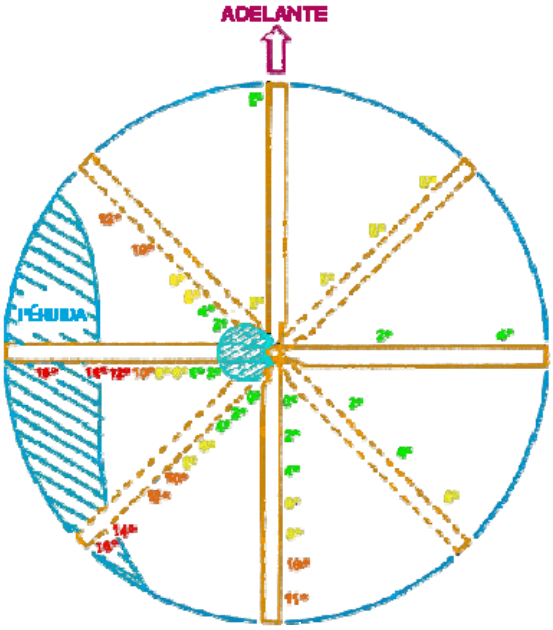


Figura 2-63. PÉRDIDA EN LA PALA QUE RETROCEDE

Esto produce que la parte exterior de la pala deba generar más sustentación para compensar la disminución de la sustentación en la parte interna de la misma. En el área de "flujo reversivo", la velocidad de rotación de esta parte de la pala es menor que la velocidad del helicóptero, por lo tanto el flujo de aire se desplaza desde el borde de fuga hacia el borde de ataque (sí, esta bien escrito). Esta zona tiene un alto ángulo de ataque pero no es suficiente como para generar sustentación.
La figura muestra un disco de rotor que ha alcanzado una condición de pérdida sobre la pala que retrocede.



Asumimos que el ángulo de ataque de entrada en perdida, para este rotor, es de 14º. La distribución del ángulo de ataque es mostrada en 8 posiciones diferentes, a lo largo del recorrido de la pala en el rotor. Aunque las palas están torsionadas, teniendo menos pitch en las punteras que en la raíz, el ángulo de ataque en la puntera es mayor debido al flujo inducido.
Cercano a la entrada en pérdida, el primer efecto que se nota es una apreciable vibración sobre el helicóptero. Esto es seguido por una tendencia a girar y a levantar la nariz. La tendencia a levantar la nariz puede que no sea muy notoria en los helicópteros con rotor semi-rígido, dada su acción pendular. Si el mando cíclico es sostenido hacia adelante, y el paso colectivo es mantenido o aumentado, las condiciones se agravarán, las vibraciones aumentarán y se puede perder el control

Resumen para reconocer una entrada en perdida:

1. Vibración anormal.
2. Tendencia a girar hacia la izquierda.
3. La nariz del helicóptero tiende a subir.

Cuando se opere a altas velocidades, las siguientes condiciones "ayudaran" para una entrada en pérdida:

1. Alta carga discal (alto peso operativo).
2. Bajas RPM.
3. Alta densidad de altitud.
4. Empinados o abruptos giros.
5. Turbulencia.

Cuando se vuele en las condiciones enumeradas arriba, extremo cuidado se debe tener y evitar las maniobras bruscas o los giros con mucha inclinación. El control sobre el helicóptero y limitaciones estructurales se encuentran seriamente amenazados.
La pérdida normalmente ocurre a altas velocidades de translación, por eso para prevenirlas, el piloto debe volar más "suave" que lo normal cuando:

1. La densidad de altitud sea más grande que la normal.
2. Vuele cerca del límite operativo de peso.

3. Vuele con componentes que generen una alta resistencia, como: flotadores, armamento, carga externa, faros externos, etc.

4. Turbulencia.

Cuando el piloto sospeche de una posible entrada en pérdida, puede prevenirla:

1. Reduciendo potencia (reduciendo paso colectivo).

2. Reduciendo la velocidad de translación.

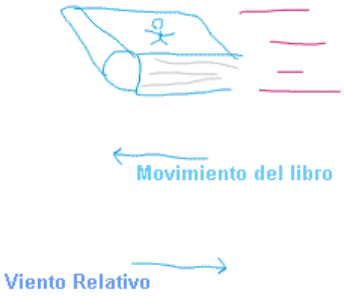
3. Reduciendo las "G" en las maniobras.

4. Incrementando las RPM (si es posible).

En casos severos de pérdida, el piloto pierde el control, por eso se recomienda que, ante la menor duda, cumplir lo mas rápido posible con los puntos enumerados anteriormente.

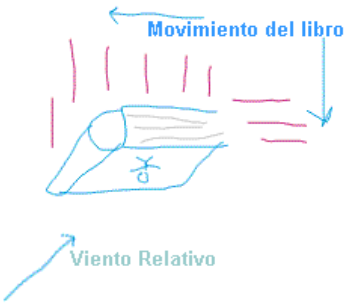
FLAPEO - FLAPPING

El flapping es bastante difícil de entender al principio, aunque en realidad es un concepto bastante sencillo. Un par de cosas necesitará para entender la relación entre el ángulo de ataque y el viento relativo. Viento relativo es simplemente el aire que encuentra un cuerpo en movimiento. El viento siempre estará moviéndose opuestamente a su movimiento.
Por ejemplo, tome un libro de tapas duras en su mano, y suéltelo. Piense en una pequeña persona pegada en la parte superior del libro. Cuando el libro cae, él siente el viento directamente viniendo desde el suelo. Este es el viento relativo debido al movimiento del libro.
Ahora, apoye el libro sobre una mesa, y provoque sobre el un movimiento lateral, observe la dirección



del viento relativo.

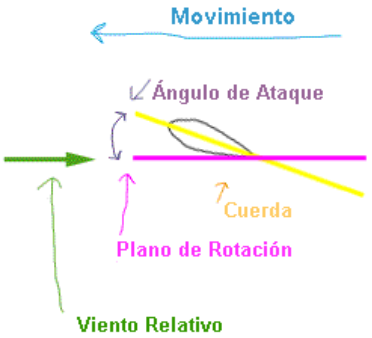
Que pasa si sacamos la mesa, mientras el libro se sigue moviendo lateralmente, permitiendo que el libro caiga; este tendrá dos componentes, una vertical y otra horizontal, como esto;



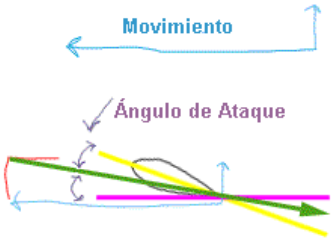
Note que el viento relativo es la combinación del movimiento vertical y el horizontal. Si dibujamos esto y sacamos la componente obtendremos el viento relativo al pequeño muñeco colocado sobre el libro.

Observe que las dos líneas azules tienen la misma longitud, y que el ángulo formado es de 45º. Esto no es casualidad, veamos otro ejemplo:

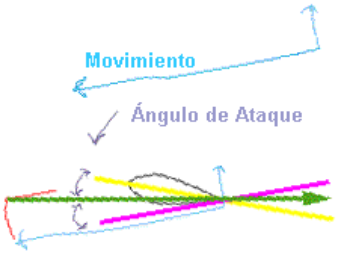
Aquí el movimiento horizontal es dos veces mas rápido que el vertical, provocando un cambio en el ángulo del viento relativo.
Ok, vamos a ver que sucede con el flapping. Si no fue bastante obvio, el libro representaba la pala del rotor. Veamos una pala de rotor girando, pero no "flapeando"



Si, se ve bastante complicado, pero vayamos por parte. La línea azul es el movimiento de la pala. La línea verde es el viento relativo. Como por ahora existe solo un componente de movimiento, la línea verde (viento relativo) es horizontal. La línea rosa es el plano de rotación del rotor. Esta condición, por ejemplo, la podemos encontrar en un vuelo estacionario ideal (sin viento, sin turbulencia, sin... NADA). En la figura siguiente, hemos agregado un poco de movimiento vertical



En la parte superior se pueden ver los dos movimientos (note que, la pala está flapeando hacia arriba). Yo también he dibujado las líneas de movimiento abajo y con el uso de las dos líneas rojas obtuve una componente (línea verde) que es el viento relativo.
Ahora recuerde que: el viento relativo es igual y opuesto a la dirección que lleva el objeto, así que la línea verde le da una idea del trayecto de la pala. Claramente este es un movimiento hacia adelante y arriba. El tema importante es que el ángulo entre el viento relativo y la línea de la cuerda es ahora de la mitad. La sustentación también es la mitad.
Si no es suficientemente claro vamos a girar un poco el dibujo, pero haciendo que el viento relativo este horizontal.



Bien, ¿pero que es lo que produce que la pala suba?. La respuesta es simple: El exceso de sustentación.
Recuerde que, en vuelo, el ángulo de la pala se limita cuando la resultante de la sustentación y la fuerza centrífuga se balancean (ver fig.). Si nosotros aumentamos la sustentación, y la fuerza centrífuga

FUERZAS LIMITADORAS DE BATIMIENTO

permanece constante, la pala subirá hasta que otra vez la sustentación y la fuerza centrífuga se equiparen.

TORQUE O PAR MOTOR

Conforme con la Ley de Newton de acción y reacción, el fuselaje tiende a rotar en sentido opuesto a las palas del rotor principal. Este efecto es llamado torque o par de torsión. El torque debe ser contrarrestado y controlado antes de ser posible el vuelo. En los diseños de helicópteros con rotores en tandem o en rotores contrarrotatorios el torque se neutraliza, como no existe este fenómeno en los helicópteros con rotación de palas por motores colocados en las punteras de las mismas (tip-jets), o en otros diseños como por ejemplo, por salida de aire a presión por el borde de fuga de las mismas palas.
Sin embargo, el torque es un factor muy importante a considerar en los helicópteros con un solo rotor principal que efectúa su rotación por un motor. Los efectos del torque sobre el fuselaje son un resultado directo del trabajo efectuado por el rotor principal. Cualquier cambio de potencia dará por resultado un cambio del torque sobre el fuselaje. Además, el torque también variará con las maniobras de vuelo y este cambio debe ser continuamente corregido.

ROTOR DE COLA

La compensación del torque en los helicópteros con un solo rotor principal es por medio del rotor antipar o rotor de cola. Este rotor produce un empuje en sentido contrario al torque generado por el rotor principal, compensando el torque. Como durante el vuelo, por los cambios de potencia, el torque cambia, es necesario que el empuje del rotor de cola también cambie. Los pedales del piloto habilitan a este para compensar el cambio de torque. Pero, todo tiene su costo, debido a que, una significativa parte de la potencia es usada para el manejo del rotor de cola, siendo del orden del 5 % al 30 %, según la maniobra a realizar y el diseño y características del helicóptero. Normalmente los helicópteros más grandes utilizan mas potencia para manejar el rotor de cola que los helicópteros más chicos (un helicóptero con 9500 HP usaría unos 1200 HP para el rotor de cola, cuando, uno de tan solo 200 HP utiliza unos 10HP para su rotor antipar).

CONTROL DE RUMBO

El rotor de cola también es usado para el control de rumbo en vuelo, además de realizar los cambios en vuelo estacionario. Este es uno de los controles básicos que el piloto debe realizar, compensando en todo momento los cambios de potencia en todas las fases del vuelo. Más adelante veremos como estos cambios, a veces, no son realizados siempre de la misma manera (a mayor potencia, más pedal izquierdo), debido a que, en vuelo recto y nivelado y a cierta velocidad entran a jugar otros factores para el control del rumbo.

También, en la autorrotación, debido a que el rotor no genera torque, el piloto debe aplicar pedal derecho para mantener el rumbo.

TENDENCIA A LA TRANSLACION LATERAL

Durante el vuelo estacionario, los helicópteros con un solo rotor principal, tienen tendencia a desplazarse lateralmente hacia la derecha, por causa del empuje del rotor de cola. El piloto debe compensar este desplazamiento inclinando el rotor principal hacia la izquierda, pero debido a esto es que, si observan a un helicóptero aterrizar, verán que siempre es el patín izquierdo (o la rueda izquierda) el que primero toca el suelo (será el derecho en los helicópteros franceses).

El diseño de los helicópteros incluye uno o más de las siguientes características para ayudar al piloto para compensar este desplazamiento lateral:

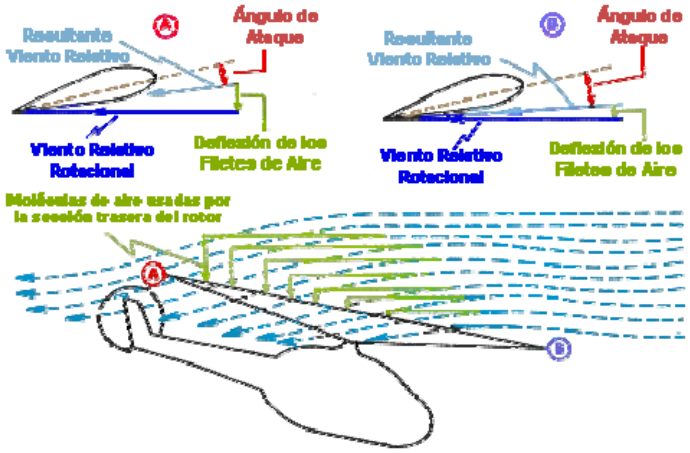
a) Los controles de vuelo pueden ser diseñados para que el disco de rotor esté inclinado hacia la izquierda y el mando cíclico centrado.

b) La transmisión principal montada para que el mástil del rotor principal esté inclinado unos grados hacia la izquierda.

c) El sistema del control del "pitch" puede ser diseñado para que cuando se aumente el mismo el disco de rotor se incline hacia la izquierda.

FLUJO DE AIRE TRANSVERSAL

En vuelo hacia adelante, el aire que pasa a través de la parte posterior del disco del rotor tiene un flujo de aire descendente (downwash) mayor que la parte delantera.



EFECTOS DEL FLUJO TRANSVERSAL

El flujo de aire descendente en la parte trasera del disco provoca un reducido ángulo de ataque, resultando en una menor sustentación. Debido a que el flujo de aire es más horizontal, un mayor ángulo de ataque y una mayor sustentación se obtienen en la parte frontal del disco. Esta diferencia entre la parte trasera del disco y la parte frontal es llamada flujo transversal. Este flujo transversal causa diferencias de resistencia entre ambas partes del disco, resultando en vibraciones que son fácilmente reconocidas por el piloto. Estas vibraciones son normalmente mas notorias a 10/20 Kts.

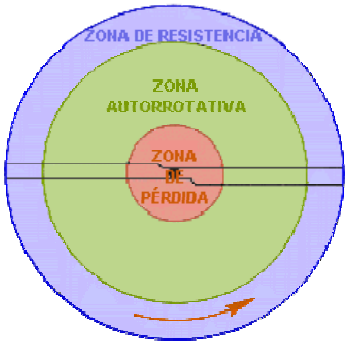
AUTORROTACIÓN

La autorrotación, o régimen de molinete, fenómeno peculiar de los aerodinos de alas rotatorias, asegura a estos aparatos la capacidad de aterrizar con seguridad en caso de falla del motor. Durante el vuelo normal, el rotor de un helicóptero gira gracias al motor. Cuando el motor falla, o es deliberadamente desenganchado, algunas otras fuerzas deben ser usadas para mantener las RPM y así lograr un aterrizaje sin problemas.

El flujo del aire durante el descenso del helicóptero provee la energía para vencer la resistencia de la pala y girar el rotor. Cuando el helicóptero está descendiendo de esta forma, se dice que está en autorrotación. En efecto, el piloto entrega altitud, en un rango controlado, a cambio de mantener las RPM del rotor. Dicho de otra manera, el helicóptero tiene energía potencial en virtud de su altitud. Al comenzar el descenso, la energía potencial se transforma en energía cinética, almacenada en el giro del rotor. El piloto utiliza esa energía cinética para amortiguar el aterrizaje cuando está cerca del suelo.

La mayoría de las autorrotaciones son ejecutadas con velocidad hacia adelante. A los fines de la explicación, vamos a utilizar una autorrotación sin desplazamiento hacia adelante y con viento calmo (la fácil primero). Bajo estas condiciones, las fuerzas que hacen que las palas giren, son iguales para todas, sin importar su posición (pala que retrocede o que avanza). Por la tanto, la disimetría de la sustentación, en este caso, no influye, siendo considerada más adelante.

Durante una autorrotación vertical, el disco del rotor está dividido en tres regiones claramente marcadas como podrán observar en la siguiente figura:

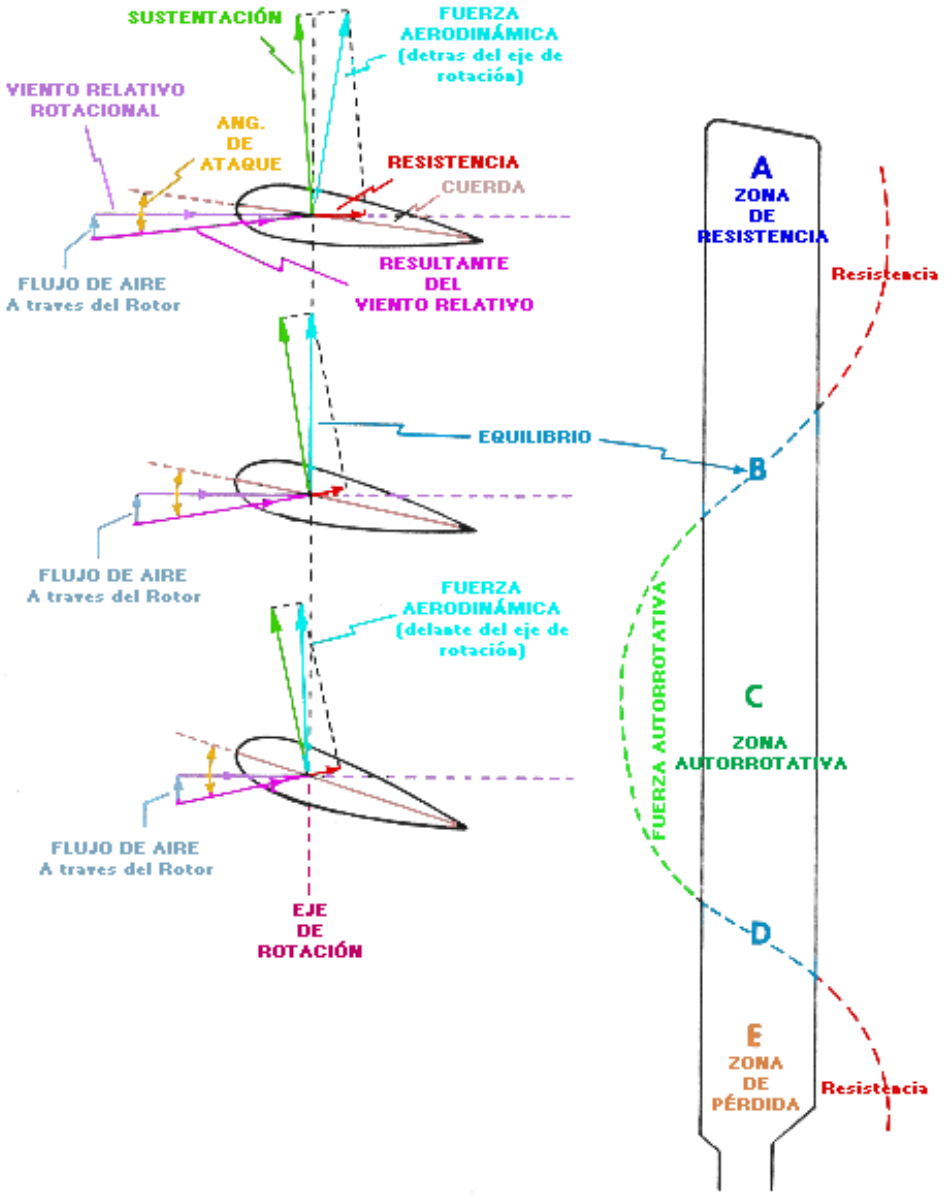


La zona pintada de azul es la que llamamos "Zona de Resistencia", se ubica cerca de la puntera de las palas y abarca un área de alrededor de un 30 % del radio. La Fuerza Aerodinámica en esta región está inclinada ligeramente detrás del eje de rotación. Esto da por resultado en una fuerza de resistencia que tiende a disminuir la rotación de las palas.

La Zona Autorrotativa, representada en color verde, se encuentra normalmente entere el 25 al 70 % del radio del rotor. La Fuerza Aerodinámica en esta región se ubica ligeramente hacia adelante del eje de rotación, resultando con esto en un "empuje" que tiende a acelerar la rotación de las palas.

La tercer región, representada en color rojo, es la Región de Pérdida, normalmente ubicada desde el centro del rotor hasta un 25 % del mismo. Esta zona opera sobre el ángulo de ataque de la pérdida de sustentación, causando resistencia que tiende a "frenar" a la pala.

La siguiente figura nos muestra lo expresado anteriormente (Pág. Siguiente):


SUSTENTACIÓN
FUERZA AERODINÁMICA (detras del eje de rotación)
VIENTO RELATIVO ROTACIONAL
ANG. DE ATAQUE
RESISTENCIA
CUERDA
FLUJO DE AIRE A traves del Rotor
RESULTANTE DEL VIENTO RELATIVO
EQUILIBRIO
FLUJO DE AIRE A traves del Rotor
FUERZA AERODINÁMICA (delante del eje de rotación)
FLUJO DE AIRE A traves del Rotor
EJE DE ROTACIÓN
A
ZONA DE RESISTENCIA
Resistencia
B
FUERZA AUTORROTATIVA
C
ZONA AUTORROTATIVA
D
E
ZONA DE PÉRDIDA
Resistencia

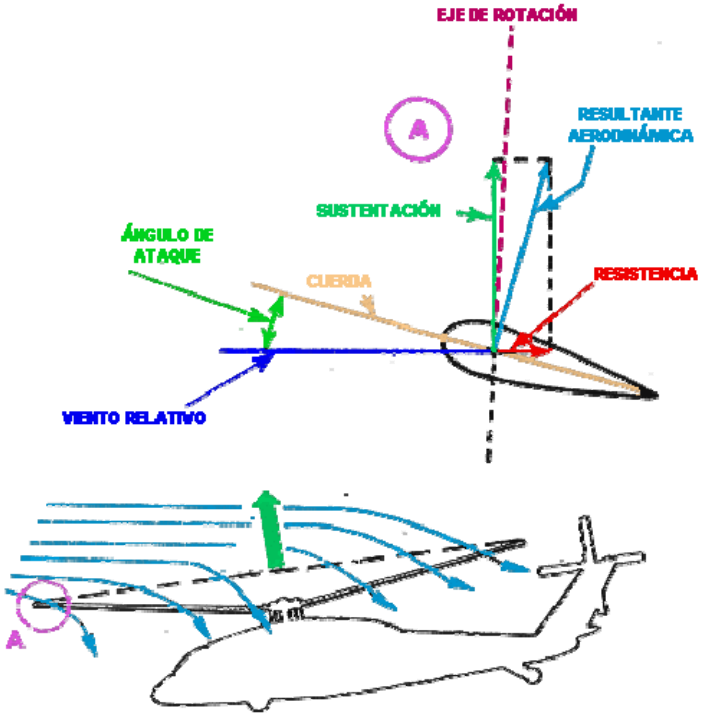
Los vectores de las fuerzas son diferentes en cada región, debido a que el viento relativo es menor en la raíz de la pala que en la puntera. La combinación del flujo de aire a través del rotor y el viento relativo por la rotación produce diferentes posiciones de la fuerza aerodinámica con respecto al eje de rotación.
Como ya dijimos anteriormente, en la zona de resistencia, la fuerza aerodinámica se encuentra desplazada hacia atrás del eje de rotación. Las medidas de esta zona varían con la posición del pitch, el rango de descenso y las RPM del rotor. Cuando el piloto toma acción para corregir las RPM, cambiar el ángulo de las palas o variar el rango de descenso, lo que hace es cambiar las medidas de este área.
Entre la zona de resistencia y la zona autorrotativa se encuentra un punto, en el cual, la fuerza aerodinámica se encuentra perpendicular al eje de rotación (punto B en la figura), al que llamamos punto de equilibrio. Sustentación y resistencia son producidas en este punto, pero su efecto no genera ni aumento ni disminución en la rotación de las palas. El punto "D" también es un punto de equilibrio.
El área "C" es a la que llamamos "Zona Autorrotativa", zona en la cual se generan las fuerzas para hacer girar al rotor. La fuerza Aerodinámica se encuentra inclinada hacia adelante del eje de rotación, produciendo una aceleración continua.

AERODINÁMICA DE LA AUTORROTACIÓN CON VELOCIDAD

Las fuerzas que componen la autorrotación con velocidad son las mismas que en la autorrotación vertical y con viento calmo. Sin embargo, debido a que la velocidad cambia el flujo de aire a través del disco del rotor, la región autorrotativa y la región de perdida se mueven hacia el lado de la pala que retrocede, donde el ángulo de ataque es más grande.

REGIONES EN VUELO HACIA ADELANTE

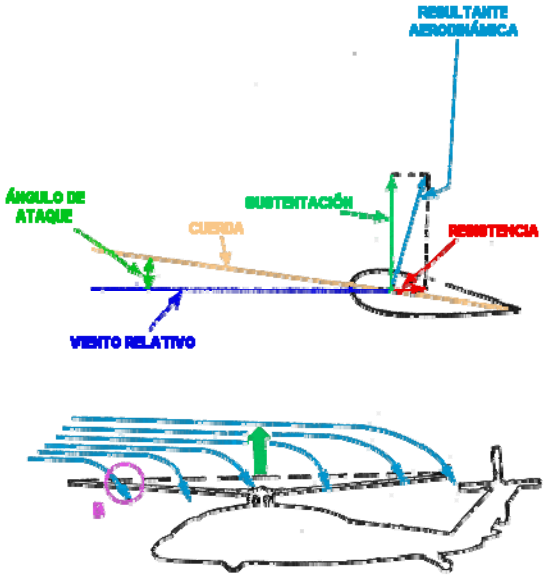
Debido al bajo ángulo de ataque de la pala que avanza, la mayor parte de la zona de resistencia se encuentra sobre este sector. En la pala que retrocede se ubica la mayor parte de la zona de pérdida y una parte muy pequeña de la parte de la raíz tiene flujo reversivo. La zona de resistencia se encuentra reducida.
La autorrotación puede dividirse en tres fases: la entrada, el descenso estabilizado y la desaceleración y posterior aterrizaje. Cada una de estas fases son aerodinámicamente diferentes unas de las otras.
La entrada en autorrotación es subsiguiente a la plantada del motor. Inmediatamente a la pérdida de potencia, las RPM del rotor comienzan a decrecer, siendo más notoria esta perdida de RPM con altos valores de paso colectivo. En la mayoría de los helicópteros esta perdida de RPM es bastante rápida, obligando al piloto a una rápida reducción del paso colectivo que prevenga de una reducción de las RPM del rotor más allá del límite inferior de las mismas. Además, una acción de "cíclico atrás" si la plantada del motor se produce a altas velocidades (esta técnica variará con los diferentes modelos de helicópteros) debe ser realiza por el piloto.
La siguiente figura muestra el flujo de aire y los vectores de fuerza para una pala en vuelo con potencia y a alta velocidad (Pag. Siguiente):



VECTORES DE FUERZAS EN VUELO NIVELADO A ALTA VELOCIDAD

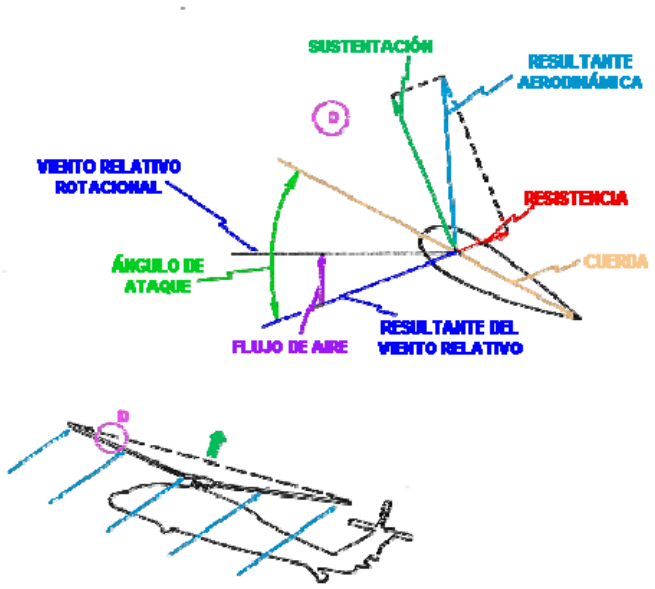
Note que la resistencia y la sustentación son bastantes grandes y que la fuerza aerodinámica se encuentra bien inclinada hacia atrás del eje de rotación. Si el motor se planta en estas condiciones de vuelo, las RPM del rotor van a disminuir rápidamente. Para prevenir esta situación el piloto debe bajar rápidamente el paso colectivo logrando con esto disminuir la resistencia e inclinar la fuerza aerodinámica total hacia adelante, cercana al eje de rotación.

La siguiente figura nos muestra las diferentes fuerzas en el momento posterior a la perdida del motor:



VECTORES DE FUERZAS DESPUES DE PÉRDIDA DE POTENCIA CON EL PASO COLECTIVO REDUCIDO

El paso colectivo ha sido reducido pero el helicóptero no ha comenzado aún el descenso. Note que, la sustentación y la resistencia se han reducido y la fuerza aerodinámica se ha desplazado hacia adelante, con respecto al vuelo con potencia.
Cuando el helicóptero comience el descenso, el flujo de aire cambiará, causando que la fuerza aerodinámica se desplace más hacia adelante, hasta que alcance un equilibrio donde mantenga las RPM en el rango operativo normal para una autorrotación. El piloto establece un planeo a una velocidad entre los 50 a 75 Kts. , dependiendo del helicóptero y el peso operativo.
La siguiente figura muestra al helicóptero en descenso estabilizado:
El flujo de aire es ahora ascendente debido al descenso del helicóptero, provocando un alto ángulo de ataque (note que el ángulo de la pala no ha variado con respecto a la figura anterior, donde el descenso, todavía, no se había establecido). La fuerza aerodinámica se inclina hacia adelante hasta que logra un equilibrio, a partir de este momento, las RPM y el rango de descenso se estabilizan y el helicóptero desciende a un ángulo constante. El ángulo de descenso normal es aproximadamente de 17 a 20 grados, dependiendo de la velocidad del helicóptero, la densidad de altitud, el viento, el diseño particular de cada helicóptero y de otras variables (peso operativo, turbulencia, etc.).
Vamos a ver ahora la última parte de la autorrotación a la que llamamos desaceleración o parada rápida (Flare):



DESACELERACIÓN (PARADA RÁPIDA - FLARE)

Para obtener un aterrizaje normal en autorrotación el piloto debe reducir la velocidad y el ángulo de descenso, antes del toque con el piso. Estas dos acciones son realizadas con el control cíclico, hacia atrás, que cambia la posición del disco del rotor con respecto al viento relativo. El cambio de actitud, inclina la fuerza aerodinámica hacia atrás y se reduce la velocidad de translación. Se incrementa el ángulo de ataque de las palas, debido al cambio de la dirección del flujo de aire. Como resultado, la sustentación es incrementada y el rango de descenso es reducido. Las RPM también son incrementadas cuando el vector de la fuerza aerodinámica aumenta, por lo tanto, la energía cinética de las palas es aumentada permitiendo un aterrizaje mas suave. Luego que la velocidad hacia adelante es reducida, así como el rango de descenso, el piloto debe comenzar a utilizar el paso colectivo para obtener un aterrizaje seguro

ASENTAMIENTO CON POTENCIA

Se denomina asentamiento con potencia, cuando el helicóptero se establece dentro de su propio flujo descendente (downwash).

Las condiciones para un asentamiento con potencia son, un descenso vertical o casi vertical, de al menos unos 300 pies por minuto y una baja velocidad horizontal. Estas condiciones pueden producirse, normalmente, en aproximaciones con viento de cola o cuando se está volando en formación y se ingresa en la zona de turbulencia dejada por la otra aeronave.

Bajo las condiciones expresadas arriba, el helicóptero puede descender a un alto rango, el cual excede el rango del flujo inducido de la sección inferior de la pala. Como resultado, el flujo de aire de la sección inferior se dirige hacia arriba. Esto produce un anillo de vórtices secundarios que se suma a los ya conocidos formados en la punta de las palas. El resultado es un inestable flujo turbulento en una gran sección del disco de rotor, que le provoca pérdida de eficiencia aún si se le aplica más potencia sobre el mismo. Esta figura muestra el flujo de aire a lo largo de la pala, en vuelo estacionario normal:

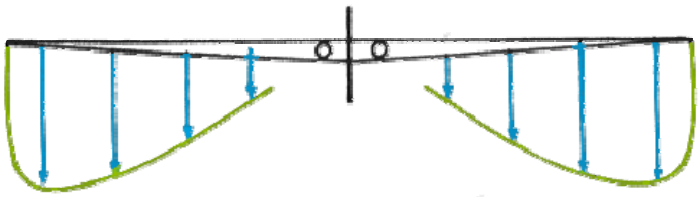
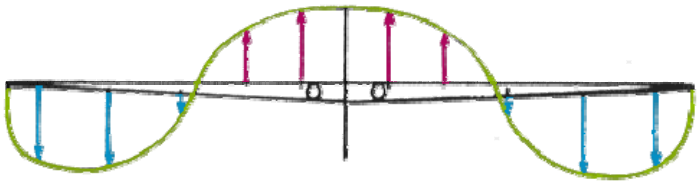
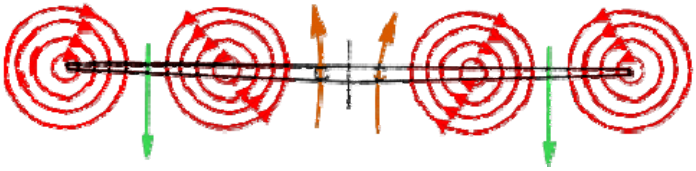


Figura 2-79. VELOCIDAD DEL FLUJO INDUCIDO DURANTE EL ESTACIONARIO.

La velocidad descendente es mayor en la punta de las palas donde la velocidad por rotación es mayor. La siguiente figura nos muestra el patrón del flujo de aire inducido, a lo largo de la pala, durante un descenso que conduce a un asentamiento con potencia.



El descenso es tan rápido que el flujo de aire inducido de la porción inferior de la pala es ascendente más que descendente. El flujo de aire hacia arriba, causado por el descenso, ha vencido al flujo de aire hacia abajo de las palas. Si el helicóptero desciende en estas condiciones, con insuficiente potencia para disminuir o parar el rango de descenso, entrará dentro del anillo turbillonario.



Durante esta situación, aspereza y pérdida de control es experimentada.
El siguiente gráfico nos muestra la relación entre la velocidad horizontal y la vertical para un helicóptero típico, en descenso. Las líneas rectas que parten desde la parte superior del gráfico (en color bordó) indican ángulos de descenso constante. Observando la figura podemos sacar algunas conclusiones:

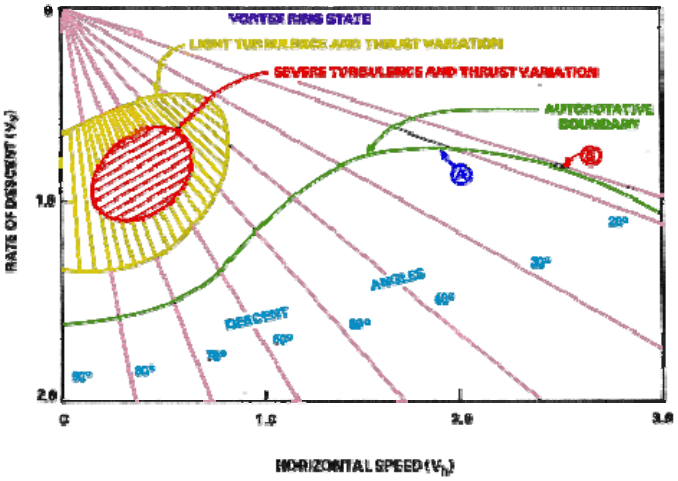


FIGURE 2-82. FLOW STATES IN DESCENDING FORWARD FLIGHT.

1. El estado de los anillos de vórtices secundarios puede ser fácilmente evitados si se mantiene un ángulo de descenso menor de 30 grados (a cualquier velocidad).

2. Para ángulos de aproximación abruptos o muy empinados, se pueden evitar la formación de los vórtices, usando velocidades más rápidas ó más lentas que el área indicada en rojo en el gráfico.

3. A muy bajos ángulos de aproximación, los vórtices son dejados detrás del helicóptero.

4. A pronunciados ángulos de ataque, los vórtices se ubican debajo del helicóptero a bajos rangos de descenso y por arriba del rotor a altos rangos de descenso.

El asentamiento con potencia es una condición inestable. Si se permite que continúe (cuando uno apenas la detecta), el rango de hundimiento del helicóptero alcanzará tales proporciones que el flujo total de aire pasará desde abajo del disco hacia arriba.
La tendencia normal, al encontrarse en un rango que nos llevará a un asentamiento con potencia es, a aplicar paso colectivo para disminuir el descenso, si contamos con un exceso de potencia suficiente y las condiciones no son tan graves, podemos salir de la situación, PERO, normalmente esta acción no hace más que agravar las cosas, debido a que al aplicar mas potencia (pitch) se obtiene mas turbulencia y se aumenta el rango de descenso. Por lo tanto, la forma más efectiva para recobrarse de esta situación es, bajar el paso colectivo y aumentar la velocidad. Por supuesto, para aplicar este método es necesario contar con altura suficiente y espacio para realizar la maniobra.

EFECTO SUELO

La alta potencia necesaria para mantener un estacionario, fuera de efecto suelo, se reduce cuando este estacionario es realizado en las proximidades de la tierra. El efecto suelo mejora las condiciones sobre un helicóptero. Tomamos para esto una proximidad con la tierra de la mitad del diámetro del rotor.
El incremento en las perfomances y eficiencia de la pala, en su proximidad con el suelo, se debe a dos fenómenos diferentes.
El primero y el más importante es la reducción de la velocidad del flujo de aire inducido. Puesto que el suelo interrumpe el flujo de aire bajo el helicóptero, se reduce la velocidad del flujo descendente inducido. El resultado es menos resistencia inducida y sustentación más vertical.
La sustentación necesaria para sostener un estacionario puede ser producida con un menor ángulo de ataque y menos potencia debido a que el vector de la sustentación se encuentra más vertical.

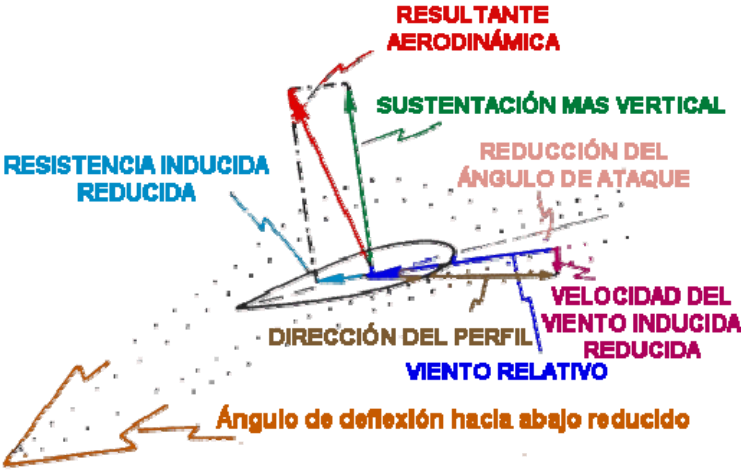
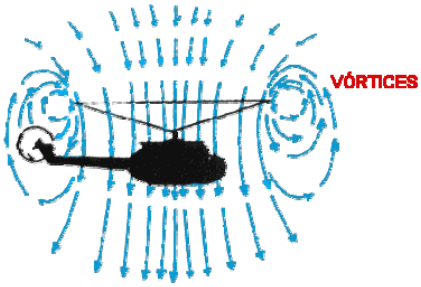


Figura 2-38. ESTACIONARIO CON EFECTO SUELO

El segundo fenómeno que sucede es la reducción de los vórtices en el extremo del rotor.



ESTACIONARIO FUERA DE EFECTO SUELO

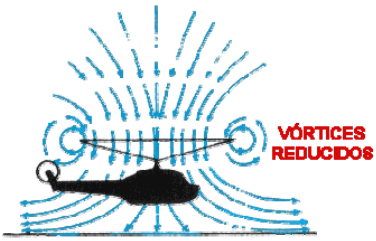
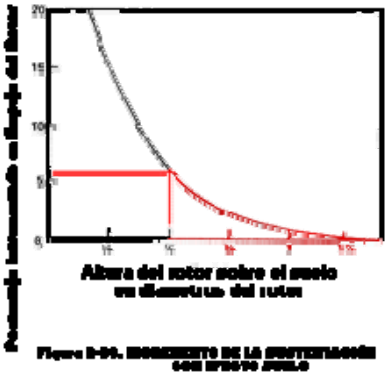


Figura 2-39. ESTACIONARIO CON EFECTO SUELO

Cuando se está operando con efecto suelo, la parte externa y descendente del flujo de aire tiende a restringir la generación de los vórtices del extremo del rotor. Esto hace más efectiva la porción externa de las palas y reduce la turbulencia causada por la ingestión y recirculación de los remolinos.
La eficiencia del rotor en efecto suelo puede considerarse hasta una altura igual al diámetro del rotor para la mayoría de los helicópteros. La siguiente figura nos muestra el porcentaje incrementado en empuje del rotor a diferentes alturas del mismo con respecto al suelo.



Como pueden ver, a una altura de la mitad del diámetro del rotor, el empuje incrementado es del 7 %. Si la altura del rotor con respecto al suelo se incrementa, por ejemplo, a una 1 ¼, se pierde todo incremento de empuje. Máximo empuje se obtiene sobre superficies lisas y pavimentadas. El estacionario con efecto suelo sobre pasto alto, agua, superficies inclinadas o rugosas, afectan considerablemente el empuje ganado.
La figura nos muestra el mismo perfil en vuelo estacionario fuera y con efecto suelo.

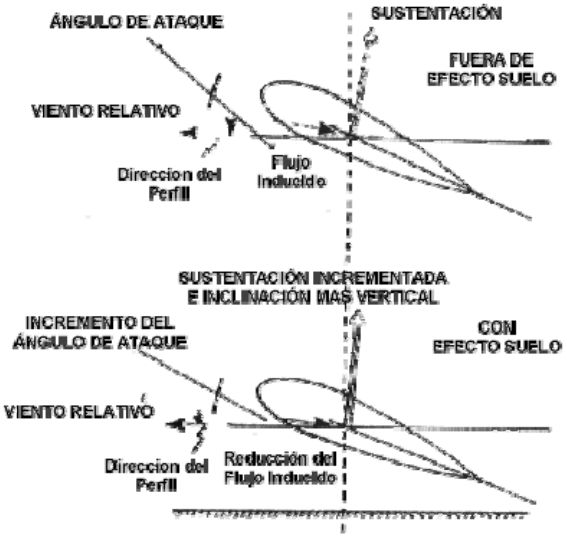


Figura 2-40. EFECTO DEL SUELO A UN ÁNGULO CONSTANTE DE PITCH

Como pueden observar el perfil que está con efecto suelo es mas eficiente debido a que tiene un mayor ángulo de ataque y produce una sustentación mas vertical.