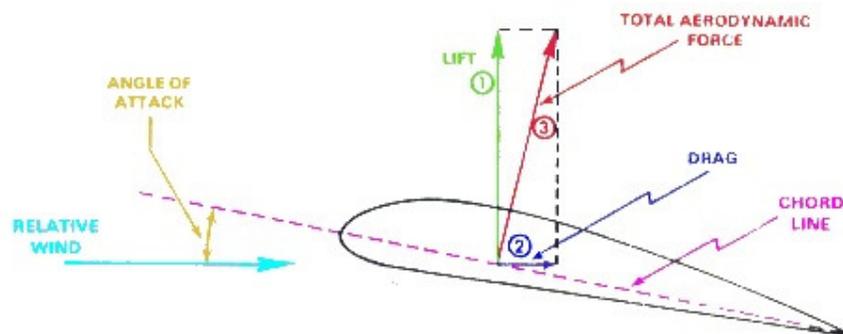


## CONTROLE E MOVIMENTAÇÃO DO HELICÓPTERO

O helicóptero é um veículo aéreo composto por um corpo e duas hélices: uma hélice principal de grande porte horizontal e outra de pequeno porte vertical na cauda do aparelho. Um turbo-motor instalado no corpo do aparelho aciona a hélice principal e a hélice de cauda. O helicóptero tem grande monobrabilidade incluindo a capacidade de pairar no ar. Sua movimentação é produzida por comandos na cabine a disposição do piloto: manche, alavanca e pedais. O controle é realizado por um complexo dispositivo mecânico que controla o ângulo de ataque das pás das hélices a partir das ações do piloto. Os fundamentos básicos do voo do helicóptero são descritos a seguir.

### SUSTENTAÇÃO DA HÉLICE

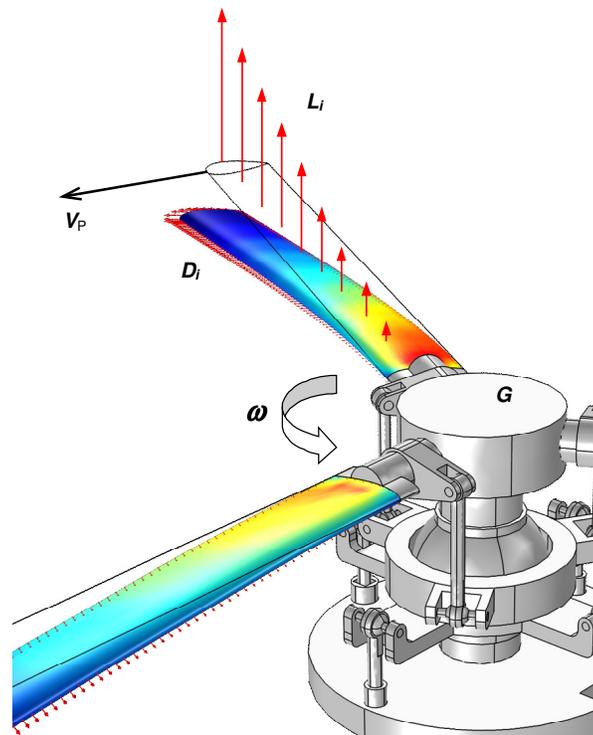
Devido ao seu formato, as pás da hélice quando passam pelo ar com ângulo de ataque (*angle of attack*) produzem diferenças de pressão que causam uma força de sustentação  $L$  (*lift*). Também produz força de arrasto  $D$  (*drag*), conforme mostrado na figura.



Devido a velocidade do helicóptero  $\vec{V}_G$  e a rotação da hélice  $\vec{\omega}$  a velocidade de um ponto  $P$  é dado por  $\vec{V}_P = \vec{V}_G + \vec{\omega} \wedge (P - G)$ . Como a velocidade em cada seção varia ao longo da pá, cada

segmento produz uma sustentação  $L_i$  para um determinado ângulo de ataque. Simplificadamente considerando a pá rígida com comprimento  $R$ , a força resultante de sustentação em cada pá é

$$L = \int_G^R L_i dr .$$

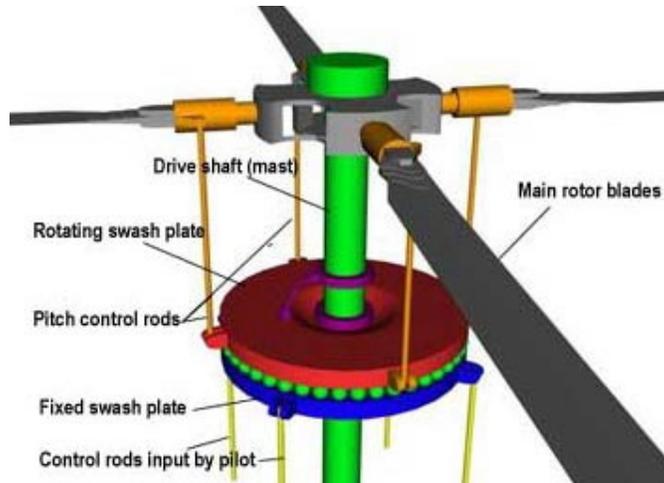


Devido ao seu tamanho, a hélice principal tem um elevado momento angular ( $\vec{H}_G$ ) que contribui para estabilizar a atitude do helicóptero. Por sua vez a hélice de cauda produz uma força  $\vec{F}_{Horizon}$  na direção horizontal necessária para anular o torque devido a força de arraste da hélice principal.



### **DISPOSITIVO DE CONTROLE (*swash-plate*)**

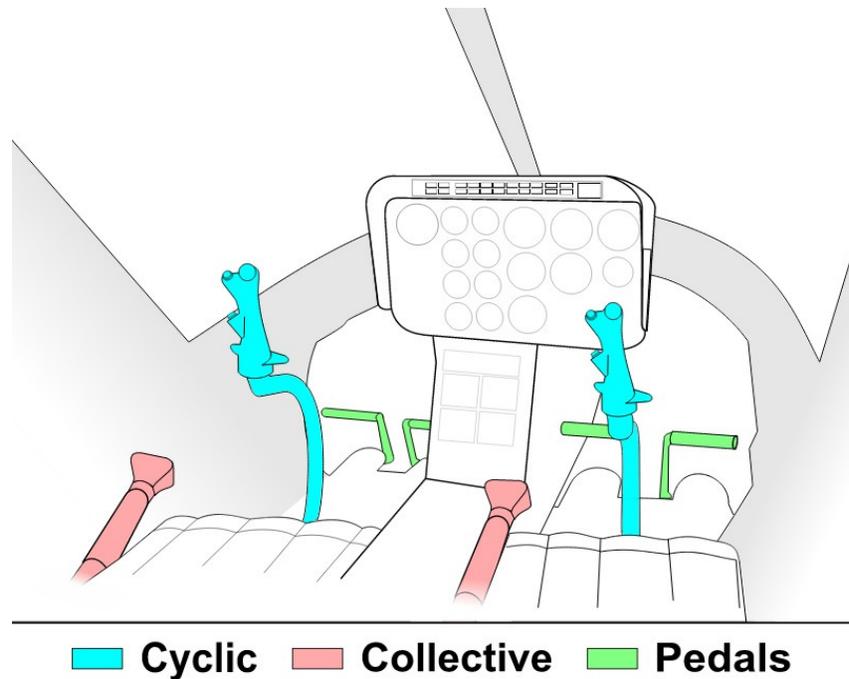
O controle do helicóptero é feito pelo comando do piloto em duas alavancas instaladas no interior da cabine, que acionam um dispositivo mecânico chamado de prato oscilante (*swash-plate*) que controla o ângulo das pás da hélice. O prato oscilante possui duas partes: uma solidária ao helicóptero (mostrada em azul na figura) e outra que gira com a hélice (mostrada em vermelho).



Quando os pratos sobem devido ao comando do piloto na alavanca de comando (comando coletivo) o ângulo de todas as pás aumenta de forma conjunta, acionadas pelos eixos de controle de ângulo das pás (*pitch control rods*). Quando o prato se inclina devido ao comando do piloto no manche, o ângulo das pás varia em função da posição angular da hélice (comando no manche - cíclico).

## CONTROLE DA ALTURA

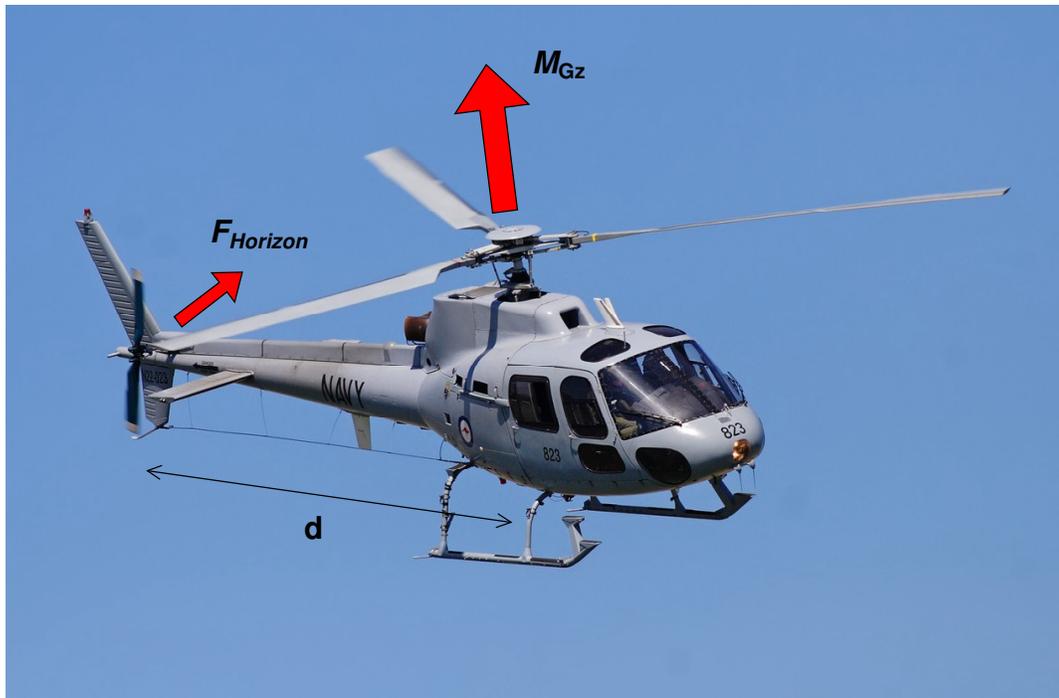
O piloto controla a altura do helicóptero variando a força de sustentação  $L$  (*lift*) que se contrapõe à força da gravidade ( $mg$ ). A ação do comando coletivo (alavanca lateral esquerda de comando) permite elevar a altura do helicóptero quando se aumenta o ângulo das pás (puxando a alavanca para cima) e a potência do motor (girando a manete da alavanca) conforme mostrado na próxima figura (note que os comandos são duplicados para o co-piloto). A altura do helicóptero pode ser mantida constante permitindo o aparelho pairar no ar (*hover*) devido à velocidade de rotação da hélice (potência do motor) e o ângulo das pás (comando coletivo).



Então quando o piloto puxa a alavanca para cima o prato oscilante translada verticalmente (se eleva paralelo em relação ao plano horizontal do helicóptero) aumentando o ângulo de todas as pás da hélice de forma conjunta (braço de controle de ângulo da pá - *pitch control rods*), aumentando a força de sustentação  $L$ . O movimento deve ser sincronizado com o aumento da rotação do motor girando a manete da alavanca.

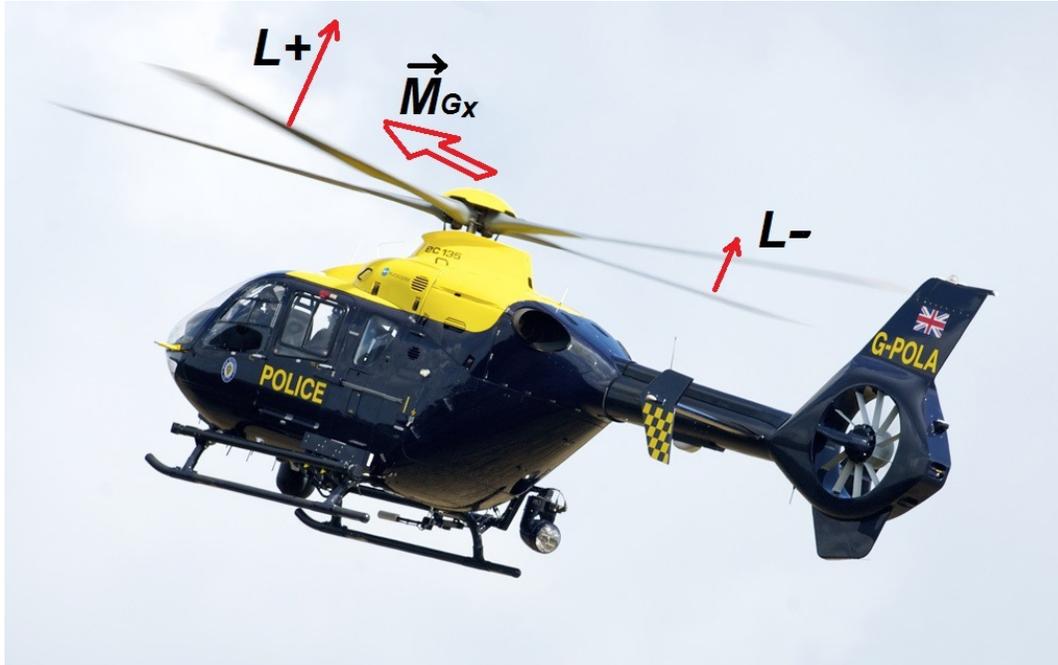
## CONTROLE DA DIREÇÃO

Enquanto a hélice principal gira para manter a altura do helicóptero, a força de arraste das pás produz um binário de forças  $\vec{M}_{Gz}$  que tende a rodar o helicóptero na direção oposta. A hélice de cauda tem a função de produzir um momento que se contrapõe a este efeito, controlando a direção do helicóptero. Este controle é feito pelo acionamento do comando de pedal (*Pedals*) que altera o ângulo das pás da hélice de cauda modificando a força horizontal  $\vec{F}_{Horizon}$  e portanto variando o momento direcional ( $\vec{M}_Z = \vec{d} \wedge \vec{F}_{Horizon}$ ).

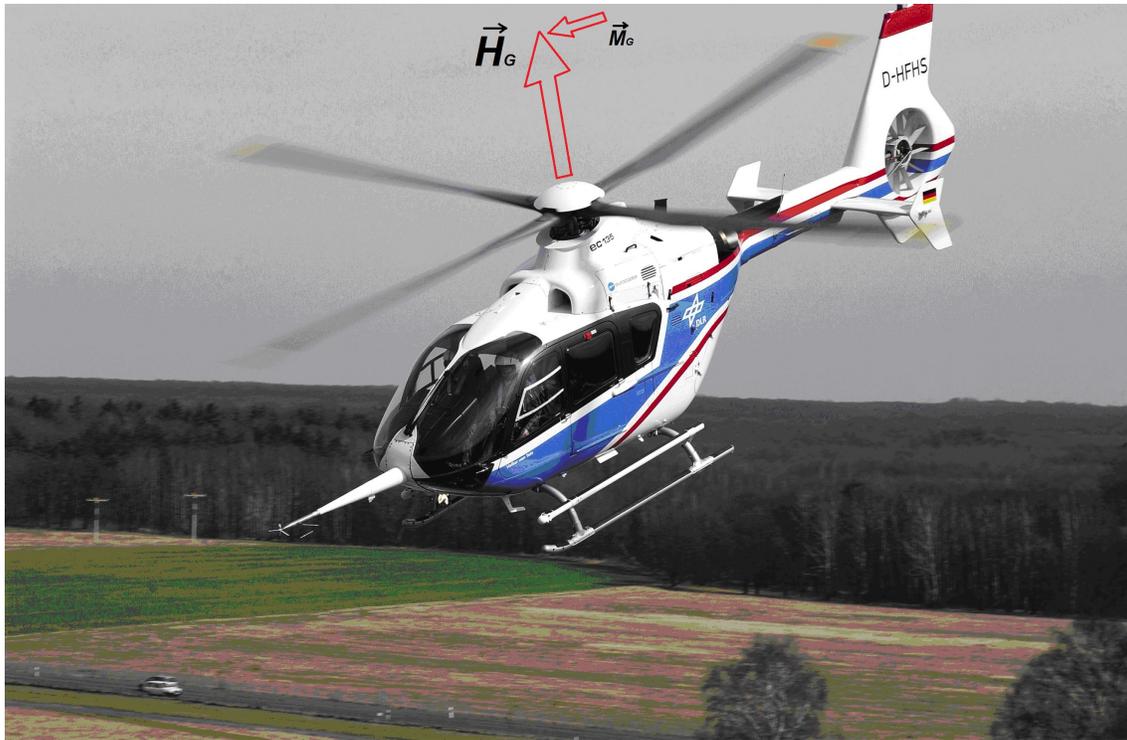


## CONTROLE DA ATITUDE

Para alterar a atitude do helicóptero o comando cíclico (manche) permite criar força de sustentação em cada pá que varia conforme a posição angular da hélice, ou seja, o ângulo de ataque da pá varia a cada ciclo da rotação. O comando cíclico altera o plano do prato oscilante (*swash plate*) produzir mais sustentação ( $L+$ ) de um dos lados do helicóptero causando um binário de momento  $\vec{M}_{Gx}$ .



Este binário de momento altera o momento angular da hélice principal conforme  $\dot{\vec{H}}_G = \vec{M}_{Gx}$ . Assim por exemplo, quando o piloto empurra o manche para frente (comando cíclico) o prato se inclina segundo o eixo longitudinal (xx) fazendo com que a pá que passa pelo lado esquerdo do helicóptero aumente o ângulo de ataque ( $L+$ ). Este fato produz o binário de momento  $\vec{M}_{Gx}$  que altera a direção da quantidade de momento angular  $\vec{H}_G$ . Desta forma o helicóptero se inclina para frente com ângulo  $\theta$  produzindo uma componente da força de sustentação naquela direção ( $F_x = L \sin \theta$ ) fazendo o helicóptero avançar. Naturalmente o piloto deve compensar a força de sustentação para manter o helicóptero na mesma altura ( $F_z = L / \cos \theta$ ) girando ligeiramente a manete da alavanca do comando coletivo.



Este comando pode produzir efeito similar na direção lateral (para qualquer lado) ou na direção oposta se for o caso (marcha à ré). Desta forma o helicóptero tem a sua posição e atitude completamente controlada permitindo um voo em qualquer direção no espaço 3D inclusive pairando no ar.

Obs.: A descrição aqui apresentada de movimento de corpo rígido é simplificada para efeito didático e existem efeitos de segunda ordem que não foram incluídos neste texto. Devido à rotação da hélice, a velocidade máxima do helicóptero é limitada pela perda de sustentação da pá que recua (conhecido como *estol*) e velocidade sônica da pá que avança.

Para mais informação consulte o livro:

R. S. Bramwell, George Done, David Balmford (1976) Helicopter Dynamics. Second edition  
Editora Butterworth-Heinemann, pp. 373.

Laboratório de Dinâmica e Simulação Veicular – LDSV site: [www.usp.br/lds](http://www.usp.br/lds)