

# **PROBLEMAS RELACIONADOS A UTILIZAÇÃO DE PÁS COMO COMPONENTES DE SUSTENTAÇÃO NOS HELICÓPTEROS E COMO FORAM SOLUCIONADOS <sup>1</sup>**

## **PROBLEMS RELATED TO THE USE OF ROTOR BLADES AS LIFT COMPONENTS IN HELICOPTERS AND HOW THEY WERE SOLVED**

**Henderson Soares de Carvalho Júnior <sup>2</sup>**

### **RESUMO**

A aviação é uma área onde constantemente se busca melhorias e inovações para garantir a segurança e o desempenho da aeronave. Os engenheiros dos helicópteros enfrentaram muitos desafios na construção de suas máquinas, sendo uns dos mais complexos relacionado a articulações nos rotores. Devido à complexidade do assunto, o estudo teve como foco demonstrar o que são as articulações, o que elas fazem e as consequências de seu uso. O trabalho consistiu em uma pesquisa do tipo básica e, a partir de leituras exploratórias, foi conduzida a revisão bibliográfica para a obtenção, análise e conclusões sobre as informações obtidas. Ao longo do trabalho foi abordado o funcionamento do helicóptero, dissimetria lateral de sustentação, efeito Coriolis e articulações de batimento e arrasto. Ao fim da pesquisa, concluiu-se que o estudo das articulações no rotor é fundamental, elas representam inovações importantes na área de aviação com helicópteros e solucionam diversos problemas. Esses avanços contribuem para tornar os helicópteros mais seguros e eficientes, ampliando seu potencial de aplicação.

**Palavras-chave:** Aviação; helicóptero; articulações.

### **ABSTRACT**

Aviation is an area that constantly seeks improvements and innovations to ensure aircraft safety and performance. Helicopter engineers have faced many challenges in building these machines, with one of the most complex being related to rotor articulations. Due to the complexity of the subject, the study aimed to demonstrate what articulations are, what they do, and the consequences of their use. The study consisted of a basic research, and through exploratory readings, a literature review was conducted to obtain, analyze, and draw conclusions from the data gathered. Throughout the study, the operation of the helicopter, lateral lift dissymmetry, Coriolis effect, and flapping and drag articulations were addressed. At the end of the research, it was concluded that the study of rotor articulations is fundamental. They represent significant innovations in the field of helicopter aviation and they solve many problems. These advancements contribute to making helicopters safer and more efficient, expanding their potential applications.

**Keywords:** Aviation; helicopter; articulations.

---

<sup>1</sup> Artigo apresentado em 15 de setembro de 2023 ao Centro de Instrução de Aviação do Exército.

<sup>2</sup> Aluno do Curso de Formação e Graduação de Sargentos - Av Mnt. Centro de Instrução de Aviação do Exército (CIAvEx). E-mail: carvalhohendersonj@gmail.com

## 1 INTRODUÇÃO

A aviação é uma área na qual constantemente se busca melhorias e inovações para garantir a segurança e a melhoria do desempenho das aeronaves. Esse setor enfrenta problemas complexos e desenvolve soluções criativas, como aconteceu no caso do desenvolvimento de materiais novos na composição de balões e da controlabilidade dos dirigíveis no passado. Com o desenvolvimento da tecnologia, novos meios aéreos surgiram e, com eles, novas dificuldades.

No caso específico dos helicópteros, um dos desafios enfrentados no passado estava relacionado aos problemas na utilização de pás como componentes de sustentação, problemas esses que poderiam comprometer a capacidade de voo dessas máquinas. Neste trabalho o objetivo é investigar os problemas relacionados a isso e explorar as soluções desenvolvidas para superar algumas limitações.

Ao apreciar o vôo do helicóptero não se imagina o jogo de forças que o fazem decolar e voar estavelmente, onde uma força se contrapõe a outra, ora fazendo com que paire (vôo no qual o helicóptero se encontra parado em relação a um referencial), ora fazendo com que suba ou desça ou ainda fazendo um vôo reto, horizontal e estável. (SÉRVULO, [2019?], p. 3).

As pás dos helicópteros desempenham um papel crucial na sustentação e controle do voo. Durante décadas, os engenheiros enfrentaram desafios significativos relacionados à resistência, desgaste, ruído e vibração resultantes de sua utilização. Esses problemas afetavam diretamente a segurança, o desempenho e a eficiência das aeronaves, limitando suas capacidades operacionais em diversas situações.

No entanto, com o avanço da tecnologia e o aprimoramento das técnicas de projeto e fabricação, foram desenvolvidas soluções inovadoras para enfrentar esses problemas: as articulações de arrasto e batimento. Esses componentes implantados no rotor garantiram um voo mais seguro e viabilizaram o desenvolvimento de aeronaves mais eficientes e com reduzida manutenção. Esses avanços impactam diretamente a indústria da aviação e têm o potencial de ampliar as aplicações e o uso dos helicópteros em diferentes setores, como transporte, resgate e defesa.

Pensando no que já foi citado, a investigação teve como tema “problemas relacionados à utilização das pás que impossibilitavam o voo”.

Mais especificamente, o objeto de pesquisa (delimitação do tema) foi “as funções das articulações na cabeça dos rotores de helicópteros”.

Baseado na delimitação do tema, este trabalho científico explorou o seguinte problema: por que precisamos desses dispositivos nos rotores dos helicópteros?

Para orientar o estudo, esse trabalho foi norteado por 01 (um) objetivo geral e 05 (cinco) objetivos específicos, sendo o objetivo geral demonstrar a necessidade das articulações nos rotores.

Para atingir o objetivo geral, a pesquisa contou com cinco objetivos específicos: a) descrever sumariamente o funcionamento de uma aeronave de asas rotativas; b) definir a dissimetria lateral de sustentação; c) entender como a articulação de batimento mitiga os efeitos da dissimetria lateral de sustentação; d) relacionar a articulação de batimento ao efeito Coriolis; e) entender o propósito da articulação de arrasto.

No começo desta pesquisa, foi conduzida uma revisão de literatura acerca da teoria de voo dos helicópteros, com ênfase nas articulações de batimento e arrasto, a fim de aprimorar a compreensão sobre os tópicos e tema em estudo.

Em relação ao procedimento de obtenção de dados, o método empregado nesta pesquisa foi do tipo bibliográfico, visto que foram realizadas leituras exploratórias e seletivas dos materiais de pesquisa disponíveis em fontes já publicadas (livros, manuais e artigos).

Em relação à finalidade, a pesquisa foi de natureza básica, conduzida por meio da análise de documentos provenientes de diversas fontes, buscando descrever como alguns problemas gerados pela utilização de pás em aeronaves são solucionados com determinadas articulações. O objetivo principal desse tipo de pesquisa é gerar conhecimentos teóricos, utilizando o método indutivo como abordagem para chegar a uma conclusão sobre a investigação em questão.

O estudo das articulações nos rotores dos helicópteros é de suma importância para garantir a segurança e o desempenho confiáveis dessas aeronaves. Esses dispositivos desempenham um papel crítico na transmissão de forças e movimentos entre as pás e os componentes do rotor, afetando diretamente a estabilidade e a capacidade de manobra do helicóptero. “Os rotores são sistemas mecânicos complexos, com múltiplas articulações e movimentos variados, que possibilitam o deslocamento do helicóptero no ar, compensando as forças aerodinâmicas que atuam sobre ele.” (MACHADO; REISDORFER, 2002, p. 37).

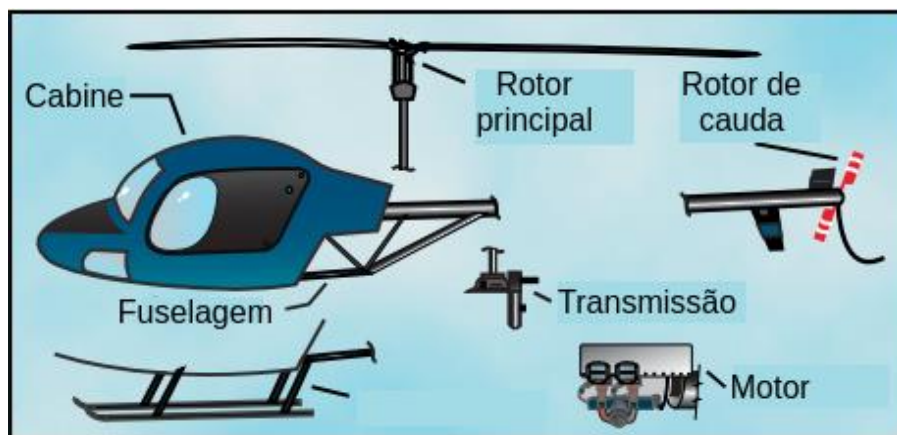
Compreender em profundidade o funcionamento e o comportamento dessas articulações permite identificar potenciais pontos de falha, desenvolver melhorias estruturais e implementar medidas de monitoramento e manutenção adequadas. Dessa forma, esse estudo contribui para aprimorar a segurança operacional, prevenir acidentes, otimizar o desempenho do helicóptero, reduzir custos operacionais e permitir processos e procedimentos de manutenção mais eficientes, resultando em uma aeronave mais confiável em suas operações.

## 2 O FUNCIONAMENTO DE UM HELICÓPTERO

Os helicópteros, como aeronaves de asas rotativas, se destacam por sua notável versatilidade e complexidade em relação às aeronaves de asa fixa. Enquanto os aviões confiam na aerodinâmica das asas para gerar sustentação e propulsão, os helicópteros empregam rotores giratórios compostos por lâminas aerodinâmicas.

Esses rotores, que podem variar em número e disposição, permitem aos helicópteros decolar e pousar verticalmente, realizar manobras em espaços reduzidos e até mesmo se movimentar lateralmente em todas as direções. Contudo, essa liberdade de movimento exige uma complexa engenharia por trás da máquina (MACHADO; REISDORFER, 2002).

Figura 1 – Principais partes de um helicóptero



Fonte: USA (2000) (adaptado pelo autor)

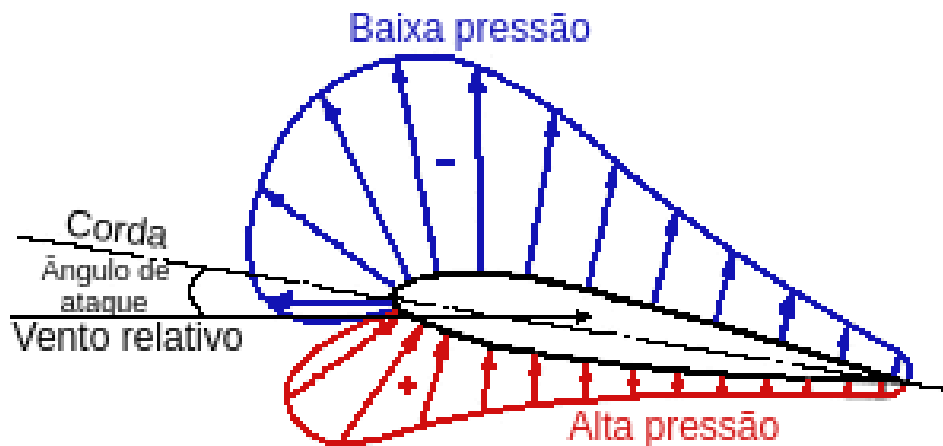
Os componentes básicos de um helicóptero incluem o rotor principal, rotor de cauda, motor e fuselagem. O rotor principal, localizado acima da fuselagem, desempenha um papel crucial na geração de sustentação e propulsão. O rotor de cauda, por sua vez, é responsável por manter a estabilidade e controlar a direção do helicóptero. A energia para girar os rotores é fornecida por motores a bordo e a fuselagem abriga a cabine do piloto, passageiros, carga e os sistemas vitais para o funcionamento da aeronave.

“As asas são responsáveis pela sustentação da aeronave. A asa possui uma estrutura cuja seção transversal é um perfil aerodinâmico capaz de gerar a força de sustentação necessária para vencer o peso da aeronave. Enquanto nos aviões a asa é considerada fixa, nos helicópteros as pás são consideradas asas rotativas” (SILVA, 2013, p. 32).

As pás do helicóptero possuem forma assimétrica, ou seja, a parte superior possui uma curvatura mais acentuada, enquanto a parte inferior é mais plana. Essa assimetria na forma

resulta em uma diferença na velocidade do ar entre a parte superior e inferior da pá quando ela está em movimento. Durante a rotação da pá, o ar que passa pela parte superior tem uma velocidade maior, o que leva a uma redução na pressão. Por outro lado, o ar que passa pela parte inferior tem uma velocidade menor, resultando em uma pressão maior. Essa diferença gera uma força ascendente, conhecida como sustentação, que levanta o helicóptero do solo.

Figura 2 - Componentes do aerofólio e sustentação



Fonte: Autor

Em suma, os helicópteros se destacam por sua versatilidade e complexidade, usando rotores giratórios para possibilitar decolagem vertical, manobras precisas e movimentos multidirecionais. Seus componentes-chave, como o rotor principal, rotor de cauda, motor e fuselagem, desempenham funções cruciais na geração de sustentação e controle da aeronave. A sustentação nas pás é alcançada por meio da diferença de pressão gerada durante a rotação, impulsionando uma força ascendente.

No entanto, as forças geradas pelas pás do rotor principal são assimétricas e, se não balanceadas, podem impactar o comportamento do helicóptero durante o voo. Nesse contexto surge a dissimetria lateral de sustentação como um desafio a ser superado. Diante disso, compreender e gerenciar esse problema é fundamental para otimizar o desempenho e a segurança dessas aeronaves.

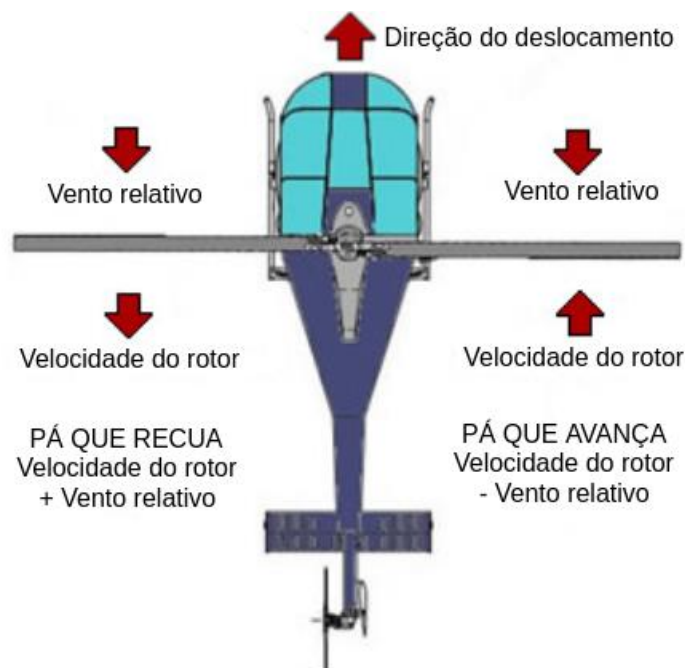
### 3 A DISSIMETRIA LATERAL DE SUSTENTAÇÃO

Durante o desenvolvimento do helicóptero, um dos principais problemas que surgiram foi a dissimetria lateral de sustentação. Quando os helicópteros voam, as pás do rotor produzem mais sustentação em uma metade do disco do que na outra. Essa diferença gera um momento de rolamento indesejado, tornando a aeronave instável e difícil de controlar. Esse fenômeno, se não controlado, ameaça a viabilidade e a segurança dos helicópteros como aeronaves para uso prático.

Ao realizar o voo a frente, o fluxo relativo de ar através do disco do rotor no lado que avança é diferente do lado que recua. O vento relativo encontrado pela pá de avanço é aumentado pela velocidade para a frente do helicóptero, enquanto o vento relativo atuando na pá de recuo é reduzido por essa mesma velocidade. Portanto, como resultado dessa diferença, o lado da pá que avança produz mais sustentação do que o lado da pá que recua. Esse efeito é definido como dissimetria lateral de sustentação (USA, 2000).

Considerando que a pá que avança terá maior sustentação e que a pá que recua menor sustentação, teremos um efeito de rolagem da aeronave para o lado onde a sustentação é menor. Este efeito aumentará com o aumento da velocidade horizontal da aeronave. A dissimetria lateral de sustentação cria em um rotor um movimento de rolagem que torna impossível a pilotagem e um risco de ruptura como consequência da fadiga.

Figura 3 - Interação entre velocidades no deslocamento à frente



Fonte: Autor

“A dissimetria de sustentação também pode ser compensada pelo movimento de batimento vertical (flapping).” (SILVA, 2013, p. 194). “Os primeiros modelos de La Cierva tendiam a tombar para o lado, devido a dissimetria de sustentação. Para eliminar esse problema, utilizaram-se pás flexíveis que eram ligadas aos punhos da cabeça do rotor por meio de articulação.” (MACHADO; REISDORFER, 2002, p. 25).

A invenção de Juan de la Cierva, conhecida como "articulação de batimento", foi um avanço fundamental na anulação dos efeitos da dissimetria. Ele projetou pás capazes de se movimentar de forma independente em resposta às mudanças na velocidade relativa do vento em cada lado do rotor. Essas pás eram conectadas aos punhos da cabeça do rotor por meio de articulações que permitiam que elas oscilassem para cima e para baixo.

O desenvolvimento dos helicópteros ao longo dos anos foi marcado por desafios significativos, sendo a dissimetria lateral de sustentação um dos principais problemas enfrentados. No entanto, graças à dedicação de pesquisadores e engenheiros, foram desenvolvidas soluções eficientes para minimizar esse fenômeno e tornar os helicópteros aeronaves confiáveis e versáteis, que desempenham um papel crucial em várias atividades humanas.

#### **4 A ARTICULAÇÃO DE BATIMENTO**

Desenvolvida pelo espanhol Juan de la Cierva, essa tecnologia trouxe uma abordagem para enfrentar a dissimetria lateral de sustentação. Ao permitir que as pás do rotor oscilassem em resposta às diferentes velocidades de vento relativo entre o lado de avanço e o lado de recuo, a articulação de batimento reduziu drasticamente os efeitos adversos que ameaçavam a estabilidade e o controle dos helicópteros. Este avanço abriu caminho para a criação de aeronaves mais equilibradas e impulsionou a evolução da tecnologia de helicópteros.

As pás do rotor principal oscilam e se ajustam automaticamente para igualar a sustentação em todo o disco do rotor. Sistemas de rotor articulado, geralmente com três ou mais pás, incorporam uma articulação de batimento para permitir que as pás do rotor se movam, oscilando para cima e para baixo enquanto giram (USA, 2000).

Nos rotores, o aumento da velocidade aerodinâmica na pá avançada faz com que ela se eleve (batimento para cima), diminuindo assim seu ângulo de ataque e sua área útil. Portanto a sustentação na pá avançada é diminuída pelo flapping. Este movimento faz com que as forças de sustentação nas pás avançada e recuada se equalizem (SILVA, 2013).

Quando uma pá sobe, sua sustentação diminui, uma vez que o ângulo de ataque da pá é reduzido. Isso ocorre porque a lâmina encontra um fluxo de ar que é menos favorável para a geração de sustentação. Por outro lado, quando uma pá desce, seu ângulo de ataque aumenta e, conseqüentemente, sua sustentação também aumenta. A combinação do ângulo de ataque reduzido na pá que avança e o ângulo de ataque aumentado na pá que recua pela ação do batimento, tende a equalizar a sustentação sobre as duas metades do disco do rotor.

A inovação introduzida por Juan de la Cierva com a articulação de batimento teve um impacto profundo no avanço da aviação no contexto dos helicópteros. Antes dessa concepção, a dissimetria lateral de sustentação era um desafio significativo que afetava negativamente a estabilidade e o controle dos helicópteros em voo. Através da implementação da articulação de batimento, que permitia ajustar dinamicamente o ângulo de ataque das pás do rotor, De la Cierva conseguiu neutralizar a dissimetria de sustentação, proporcionando uma distribuição mais equilibrada de sustentação em todo o disco do rotor.

Essa conquista abriu novas possibilidades para a operação de helicópteros, tornando-os mais controláveis e estáveis durante o voo. Embora a articulação de batimento tenha sido um avanço crucial na aviação de asas rotativas, ela também trouxe consigo alguns problemas que levaram ao desenvolvimento de outra articulação.

A articulação de batimento, ao permitir que as pás oscilassem para cima e para baixo em resposta às diferentes velocidades de vento, abordou a dissimetria lateral de sustentação, equilibrando a distribuição de sustentação no rotor. No entanto, ela não abordava completamente outro problema: a variação da velocidade das pás do rotor, que ocorria quando uma pá subia ou descia.

## **5 O EFEITO CORIOLIS E A ARTICULAÇÃO DE ARRASTO**

No contínuo avanço da aviação, muitos desafios têm sido resolvidos através da criação de soluções engenhosas. No entanto, é frequentemente observado que essas soluções podem desencadear conseqüências não desejadas, gerando novos problemas complexos. Isso aconteceu com o batimento das pás nos helicópteros: ao resolver o problema da dissimetria lateral de sustentação, foi gerado um outro, relacionado ao efeito Coriolis.

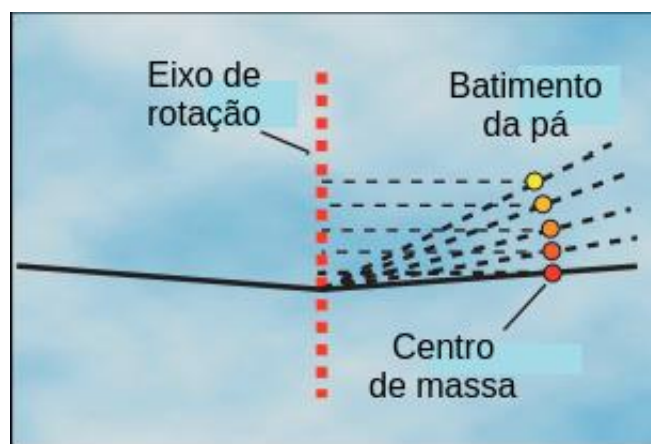
O princípio da inércia afirma que um objeto em repouso ou movimento retilíneo uniforme tende a permanecer nesse estado se a força resultante sobre ele é nula. Esse princípio se estende para os rotores, na conservação do momento angular: um corpo em rotação continuará a girar com a mesma velocidade de rotação até que alguma força externa seja



aplicada para alterá-la. E de acordo com o matemático Coriolis, mudanças na velocidade angular ocorrem se o centro de massa de um corpo em movimento for movido para mais perto ou mais longe do eixo de rotação (USA, 2016).

Sintetizando as ideias de Coriolis, para um corpo em movimento giratório, o produto da velocidade angular pela distância de seu centro de massa ao eixo de rotação deve permanecer constante. Isso afeta as pás do helicóptero quando elas realizam o movimento de batimento, se movendo no eixo vertical: o centro de massa delas é deslocado para mais perto da cabeça do rotor e sua velocidade aumenta.

Figura 4 - deslocamento do centro de massa durante o batimento



Fonte: USA (2000) (adaptado pelo autor)

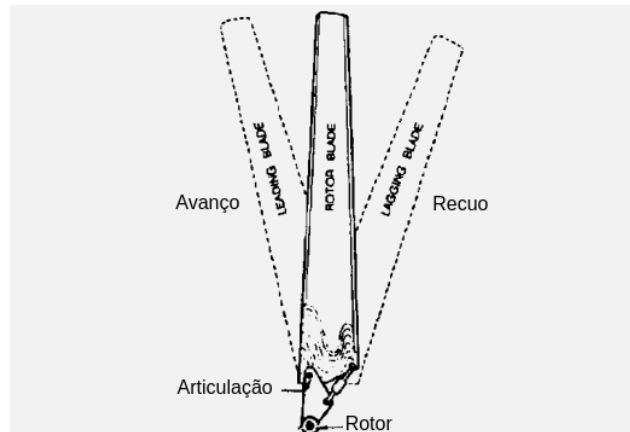
Quando uma lâmina do rotor se inclina para cima, o centro de massa dessa lâmina se move para mais perto do eixo de rotação e ocorre aceleração da lâmina para conservar seu momento angular. Por outro lado, quando essa lâmina se inclina para baixo, seu centro de massa se move para mais longe do eixo de rotação e ocorre a desaceleração da lâmina (USA, 2000).

Aqui entra em jogo a articulação de avanço-recuo. Ela permite que as lâminas do rotor girem no plano horizontal, movendo-se para frente e para trás em relação ao eixo de rotação principal do helicóptero. Quando uma lâmina se inclina e experimenta uma mudança de velocidade, a articulação permite que ela se mova para a frente ou para trás em relação ao rotor, compensando a alteração. O objetivo da articulação é compensar a aceleração e desaceleração causada pelo Efeito Coriolis, que se não controlada traz perda de estabilidade e risco de ruptura na pá (SÉRVULO, [2019?]).

Em resumo, a articulação de avanço-recuo no rotor de um helicóptero é essencial para manter a estabilidade e a velocidade constante de rotação, permitindo que as lâminas do rotor se movam para frente e para trás para compensar as variações na velocidade de rotação devido

à sua inclinação, de modo a conservar o momento angular e manter o helicóptero em voo controlado.

Figura 5 - avanço-recuo da pá



Fonte: SILVA (2013)

## 6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste estudo, exploramos os desafios enfrentados no desenvolvimento dos helicópteros e as soluções inovadoras que surgiram para superar algumas limitações. A aviação é uma área em constante busca por melhorias e inovações e, historicamente, tem lidado com problemas complexos, como a dissimetria lateral de sustentação, que ameaçava a estabilidade e o controle dos helicópteros.

Um marco importante nessa jornada foi o desenvolvimento da articulação de batimento por Juan de la Cierva, que trouxe uma forma de se enfrentar a dissimetria lateral de sustentação. Essa tecnologia permitiu que as pás do rotor oscilassem em resposta às mudanças na velocidade relativa do vento, neutralizando eficazmente os efeitos adversos que afetavam a operação dos helicópteros. Esse avanço, juntamente a outros, abriu caminho para a criação de aeronaves mais equilibradas e impulsionou a evolução da tecnologia de helicópteros.

No entanto, a solução do batimento das pás trouxe consigo um novo desafio, relacionado ao efeito Coriolis, que causava a variação da velocidade das pás durante o movimento de batimento. Para resolver esse problema, a articulação de avanço-recuo foi introduzida, permitindo que as lâminas do rotor se movessem para frente e para trás em relação ao eixo de rotação principal. Essa articulação consegue compensar a aceleração e desaceleração causadas pelo deslocamento do centro de massa, garantindo a estabilidade e a velocidade constante de rotação do rotor.

Em última análise, o estudo das articulações nos rotores dos helicópteros é de extrema importância para a aviação, contribuindo para a segurança, o desempenho eficaz, a confiabilidade e a evolução contínua dessas aeronaves. Compreender profundamente esses dispositivos permite identificar potenciais pontos de falha, desenvolver melhorias estruturais e implementar medidas de monitoramento e manutenção adequadas. Dessa forma, esse estudo desempenha um papel fundamental na otimização das operações de helicópteros, resultando em aeronaves mais confiáveis, seguras e eficientes em suas atividades.

## REFERÊNCIAS

MACHADO, Alessandro José; REISDORFER, Marcio Leandro. **Conhecimento geral dos helicópteros**: livro didático. Referências: elaboração. Rio de Janeiro: ABNT, 2002.

SÉRVULO, professor. **Apostila de helicóptero**: conhecimentos técnicos. [S. l. : s. n.][2019?]

SILVA, Ramón Eduardo. **Teoria de voo**: especialização em engenharia aeronáutica. Taubaté: Universidade de Taubaté, 2013.

USA, Headquarters department of the army. **Training Circular TC 3-04.4**: Fundamentals of Flight. Washington, D.C.: Army Publishing Directorate, 2016.

USA, U.S. Department of transportation federal aviation administration. **FAA-H-8083-21**: Rotorcraft flying handbook. Oklahoma city: U.S. government printing office, 2000.