



UNISUL

UNIVERSIDADE DO SUL DE SANTA CATARINA

ÍCARO MARCOLIN SAMPAIO

**AERODINÂMICA: O DESENVOLVIMENTO DE DISPOSITIVOS
HIPERSUSTENTADORES E SEUS BENEFÍCIOS À SEGURANÇA
OPERACIONAL**

Palhoça

2019

ÍCARO MARCOLIN SAMPAIO

**AERODINÂMICA: O DESENVOLVIMENTO DE DISPOSITIVOS
HIPERSUSTENTADORES E SEUS BENEFÍCIOS À SEGURANÇA
OPERACIONAL**

Monografia apresentada ao Curso de graduação em Ciências Aeronáuticas, da Universidade do Sul de Santa Catarina, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel.

Orientador: Prof. Angelo Damigo Tavares, MSc.

Palhoça

2019

ÍCARO MARCOLIN SAMPAIO

**AERODINÂMICA: O DESENVOLVIMENTO DE DISPOSITIVOS
HIPERSUSTENTADORES E SEUS BENEFÍCIOS À SEGURANÇA
OPERACIONAL**

Esta monografia foi julgada adequada à obtenção do título de Bacharel em Ciências Aeronáuticas e aprovada em sua forma final pelo Curso de Ciências Aeronáuticas, da Universidade do Sul de Santa Catarina.

Palhoça, 13 de novembro de 2019.

Orientador: Prof. Angelo Damigo Tavares, MSc.

Prof^ª. Patricia da Silva Meneghel, Dr^a.

Dedico este trabalho aos meus pais, Ângela e Italo.

Sustentação de todos os meus voos.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de começar agradecendo a minha família, por terem sido base da minha educação. Em especial meus pais, avós e duas primas, as quais tiveram importante participação no meu crescimento, a Guta e a Juju.

Também sou grato aos meus professores, mestres que me guiaram através do seu conhecimento até aqui, com destaque para meu orientador Prof. Angelo Damigo Tavares, pelo auxílio neste trabalho.

Por fim, como disse Vinicius de Moraes: “Eu poderia suportar, embora não sem dor, que tivessem morrido todos os meus amores, mas enlouqueceria se morressem todos os meus amigos!” Assim agradeço a eles, meus amigos, que desde sempre têm compartilhado alegrias comigo.

RESUMO

Este trabalho teve como objetivo descrever os avanços na aerodinâmica voltados para o desenvolvimento dos dispositivos hipersustentadores e seus benefícios à segurança operacional. Trata-se de uma pesquisa descritiva, com coleta de dados bibliográficos e conclusão qualitativa, através de informações em livros, impressos, revistas, filme, *sites* e *blogs* da internet. Explica-se aerodinâmica básica de voo, as principais forças atuantes, a Terceira Lei de Newton na aviação, como age o Princípio de Bernoulli no aerofólio, como uma aeronave voa, o fenômeno de perda de sustentação conhecido como estol e sua relação com a sustentação e o arrasto aerodinâmico, seguindo com a tipificação e diferenças dos dispositivos de hipersustentação, como *flaps* de bordo de fuga, *flaps* de bordo de ataque, *slats*, *slots* e seus benefícios. Em sequência, são expostas as fases críticas do voo, momentos da aplicação dos dispositivos hipersustentadores e seus efeitos na performance das aeronaves, juntamente aos efeitos positivos na economia de combustível, redução da carga de trabalho de tripulantes e organização do tráfego aéreo. Ao término da pesquisa verificou-se que devido aplicação dos conceitos aerodinâmicos, foram gerados benefícios por meio do desenvolvimento e aprimoramento dos dispositivos hipersustentadores, permitindo assim o aumento na performance de aeronaves, pilotos e nos índices de segurança operacional.

Palavras-chave: Dispositivos hipersustentadores. Aerodinâmica. *Flaps*. Segurança operacional. Performance.

ABSTRACT

This work had as objective to describe the advancements in aerodynamics to development of highlift devices and its benefits to flight safety. It is a descriptive research, with bibliographic collected data e qualitative conclusion, by information found in books, printed media, magazines, movie and internet. Is explained basics about flight aerodynamics, the main forces that affects flight, Newton's Third Law in aviation, how acts the Bernoulli's Principle on the airfoil, how an aircraft flies, the phenomenon of lift loss known as stall and its relation with lift and drag, then typification and differences of highlift devices as trailing edge flaps, leading edge flaps, slats, slots and its benefits. In sequence, are exposed the critical flight phases, when are applied the highlift devices and effects in aircrafts performance, fuel economy, reduction of crew workload and better use of airspace due to traffic. Through the research, reckoned due to the application of aerodynamics notions, were brought forth benefits by the development and improvement of the highlift devices, enhancing performance of aircrafts, pilots and increasing the operational safety.

Keywords: Highlift devices. Aerodynamics. Flaps. Operational safety. Performance.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - As quatro principais forças do voo	14
Figura 2 - Perfil da asa	15
Figura 3 - Escoamento do ar através do aerofólio em um túnel de vento	16
Figura 4 - Resultante aerodinâmica	17
Figura 5 - Descolamento da camada limite e escoamento turbulento	19
Figura 6 - Flape simples	21
Figura 7 - Flape ventral	21
Figura 8 - Flape com fenda ou flape "slotado"	22
Figura 9 - Flape Fowler	23
Figura 10 - Flape Fowler "slotado"	23
Figura 11 - Slot	23
Figura 12 - Slat	24
Figura 13 - Flape de bordo de ataque	25
Figura 14 - Protuberância de bordo de ataque	25
Figura 15 - Relação coeficiente de sustentação, ângulo de ataque e uso de flapes	27
Figura 16 - Relação coeficiente de sustentação, coeficiente de arrasto e uso de flapes	28

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANAC	Agência Nacional de Aviação Civil
CENIPA	Centro de Investigação e Prevenção de Acidentes Aeronáuticos
CIRCEA	Circular de Controle do Espaço Aéreo
CNT	Confederação Nacional do Transporte
DECEA	Departamento de Controle do Espaço Aéreo
FAA	Federal Aviation Administration
FCOM	Flight Crew Operating Manual
GPS	Global Positioning System
IFR	Regras de voo por instrumentos
IS	Instrução Suplementar
PMD	Peso Máximo de Decolagem
PMP	Peso Máximo de Pouso
RA	Resultante Aerodinâmica
RAB	Registro Aeronáutico Brasileiro
RBAC	Regulamento Brasileiro de Aviação Civil
SBF	Sociedade Brasileira de Física
SIPAER	Sistema de Investigação e Prevenção de Acidentes Aeronáuticos
SISCEAB	Sistema de Controle do Espaço Aéreo Brasileiro
VFR	Regras de voo visual

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	10
1.1 PROBLEMA DA PESQUISA	11
1.2 OBJETIVOS	11
1.2.1 Objetivo Geral	11
1.2.2 Objetivos Específicos	11
1.3 JUSTIFICATIVA	11
1.4 METODOLOGIA	12
1.4.1 Natureza e Tipificação da Pesquisa	12
1.4.2 Materiais e Métodos	12
1.4.3 Procedimentos para Coleta de Dados e Informações	13
1.4.4 Procedimentos de Análise	13
1.5 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	13
2 AERODINÂMICA DE VOO	14
2.1 3ª LEI DE NEWTON	15
2.2 PRINCÍPIO DE BERNOULLI	16
2.3 SUSTENTAÇÃO, ARRASTO E ESTOL	17
3 CLASSIFICAÇÃO E TIPIFICAÇÃO DOS DISPOSITIVOS HIPERSUSTENTADORES	20
3.1 FLAPES	20
3.1.1 Flape Simples	20
3.1.2 Flape Ventral	21
3.1.3 Flape com Fenda ou Flape “Slotado”	21
3.1.4 Flape <i>Fowler</i>	22
3.2 DISPOSITIVOS HIPERSUSTENTADORES DE BORDO DE ATAQUE	23
3.2.1 <i>Slot</i>	23
3.2.2 <i>Slat</i>	24
3.2.3 Flapes de Bordo de Ataque	24
3.2.4 Protuberância de Bordo de Ataque	25
4 USO E BENEFÍCIOS DOS DISPOSITIVOS HIPERSUSTENTADORES	26
4.1 FASES CRÍTICAS DO VOO	26
4.2 BENEFÍCIOS DOS DISPOSITIVOS HIPERSUSTENTADORES	26
4.2.1 Benefícios de Performance	27
4.2.1.1 Performance de decolagem e peso	27
4.2.1.2 Performance de pouso	28
4.2.2 Benefício Indiretos	30
5 DISPOSITIVOS HIPERSUSTENTADORES NO CONTEXTO DA SEGURANÇA OPERACIONAL	32
5.1 QUANTIDADE DE ACIDENTES	32
5.2 ACIDENTES POR TIPO DE OPERAÇÃO E POR TIPO DE AERONAVE	33
5.3 ACIDENTES DURANTE AS FASES CRÍTICAS	35
6 CONSIDERAÇÕES FINAIS	38
REFERÊNCIAS	39

1 INTRODUÇÃO

Voar, ato inerente aos pássaros, que causa tanto fascínio no homem, até então inalcançável há apenas dois séculos atrás, que hoje o possibilita encurtar distâncias, atravessar o globo, cruzar oceanos e continentes.

Todo o conhecimento oferecido às sociedades só é possível devido ao árduo trabalho e estudos de inúmeros inventores, cientistas, engenheiros, professores e muitos outros envolvidos, inclusive pilotos que testaram novos aviões, novas rotas, experimentos e tecnologias. Verifica-se, ao longo da história, que as colaborações para a aviação vieram de diferentes lugares, pelas mãos e mentes geniais de indivíduos como Sir Isaac Newton; Sir George Cayley; Otto Lilienthal; Ludwig Prandtl; Daniel Bernoulli. Com os importantes estudos e descobertas no campo da aerodinâmica realizados por tais personalidades, tornou-se possível o desenvolvimento da teoria de voo. Tal teoria é a aplicação da aerodinâmica no estudo particular do comportamento de aerofólios e aeronaves na atmosfera. (ABREU, 2015).

Apesar de controvérsias entre quem realizou o primeiro voo da história, os irmãos Wright ou Santos Dumont, encontra-se a informação no site do History Channel que, no dia 23 de outubro de 1906, no campo de Bagatelle, foi realizado pelo brasileiro, voo no 14-BIS, sendo um dos primeiros a colaborar no desenvolvimento do voo e das aeronaves como conhecemos hoje. (HISTORY, 2018)

Posteriormente, devido às duas grandes guerras a indústria aeronáutica houve grande evolução tecnológica, porém, ao fim das disputas, reduziram-se as demandas por aeronaves militares. Aliado ao fato de haver peças sobressalentes, abriu-se caminho para a implementação na aviação civil dos novos inventos desenvolvidos durante os conflitos armados. (CROUCH, 2008, *apud* FAJER, 2009).

Entre as novas tecnologias desenvolvidas, estão os dispositivos hipersustentadores e os estudos dos efeitos destes na aerodinâmica de voo, empregados desde a aviação geral de pequeno porte até os modernos grandes jatos comerciais de longo alcance. Inovações que se tornam o principal assunto deste trabalho, suas características, sua aplicação e a influência na segurança operacional.

Como sugestão para cultura aeronáutica, com destaque aos dispositivos hipersustentadores, tem-se o trágico acidente do voo 3142 da LAPA Airlines, ocorrido em 31 de agosto de 1999 na cidade de Buenos Aires, Argentina e retratado no filme “WRZ” (2004).

1.1 PROBLEMA DA PESQUISA

De que forma os dispositivos hipersustentadores trazem benefícios à segurança operacional por meio de alterações aerodinâmicas?

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo Geral

Descrever os avanços nos estudos sobre aerodinâmica e benefícios dos dispositivos hipersustentadores à segurança operacional.

1.2.2 Objetivos Específicos

- a) Descrever os princípios da aerodinâmica no voo das aeronaves.
- b) Descrever dispositivos hipersustentadores, as tipificações e diferenças básicas.
- c) Argumentar sobre a utilização dos dispositivos hipersustentadores durante as fases críticas do voo.
- d) Analisar a relação dos benefícios referentes ao uso dos dispositivos hipersustentadores com o aumento nos índices de segurança operacional ao longo do tempo.

1.3 JUSTIFICATIVA

De acordo com o relatório anual de estatísticas de transporte do Departamento de Transportes dos Estados Unidos (2018), atualmente a aviação é um dos meios de transporte mais seguros. Estima-se também que, somente no ano de 2018, as companhias aéreas brasileiras transportaram mais de 103 milhões de passageiros (BRASIL, 2019). Essa segurança nas operações aéreas se dá por um conjunto de fatores: tripulantes qualificados, não só em operação normal, mas em situações anormais; serviços de tráfego aéreo bem planejados, organizados e executados por controladores civis e militares a serviço do Sistema de Controle do Espaço Aéreo Brasileiro - SISCEAB; infraestrutura aeroportuária e de navegação dotada de capacidade para atender as demandas inerentes aos serviços requeridos.

As operações aéreas apresentam fases críticas, no que tange ao risco das operações, os momentos de proximidade ao solo, como pousos e decolagens. São nestes

momentos que se aplica o uso dos dispositivos hipersustentadores, auxiliando nas operações ao permitirem aproximações e decolagens em menor velocidade, além de frenagem mais eficiente e aumento na segurança operacional, visto que em tais ocasiões acontecem a maioria dos acidentes e incidentes aeronáuticos.

Como profissional da área, acredito que esta pesquisa se torna relevante por abordar questões sobre os dispositivos hipersustentadores, auxiliando os tripulantes quanto à aerodinâmica do voo. Nesse contexto, estes dispositivos trazendo benefícios à segurança, pilar da aviação, ajudam a prevenir a perda de vidas e bens materiais. Assim sendo, os estudos nesta monografia tornam-se subsídio ao aprendizado e capacitação operacional de tripulantes e possivelmente no desenvolvimento de novos dispositivos que venham a aprimorar a segurança operacional.

1.4 METODOLOGIA

1.4.1 Natureza e Tipificação da Pesquisa

O presente trabalho caracteriza-se por ser descritivo, com procedimentos bibliográficos de coleta de dados e abordagem qualitativa. Buscar-se-á descrever a aerodinâmica do voo, conceitos, uso e tipos de dispositivos hipersustentadores, sem alterar ou direcionar a pesquisa para o entendimento ou opinião do autor, mas registrar o tema abordado.

A coleta de dados e informações é bibliográfica, a qual será realizada por meio de livros, revistas, manuais e internet. De interpretação qualitativa, por ter como base, fatos e conceitos físicos, voltados para a análise de situação única, bem como implemento de tal tecnologia.

1.4.2 Materiais e Métodos

Os materiais analisados serão:

Bibliográficos: Livros sobre teoria de voo, performance de aeronaves e aerodinâmica, como por exemplo: ‘Pilot’s Handbook of Aeronautical Knowledge’ da FAA. Explorar-se-ão dados de segurança disponibilizados por órgãos governamentais como a ANAC e o CENIPA.

Documentais: Diversos documentos sobre aerodinâmica, inclusive da SBF (Sociedade Brasileira de Física).

Internet: *sites* e *blogs* de cultura aeronáutica.

1.4.3 Procedimentos para Coleta de Dados e Informações

O procedimento de coleta de dados será a pesquisa bibliográfica, realizada através do levantamento de informações presentes em livros, documentos e internet, a exemplo do livro ‘Aerodynamics for Naval Aviators’ em conjunto com ‘Como os Aviões Voam: Uma Descrição Física do Voo’, documento presente na Sociedade Brasileira de Física.

1.4.4 Procedimentos de Análise

A interpretação do trabalho será qualitativa, baseada em conceitos físicos e na análise de dados históricos, a fim de compreender sua interrelação.

1.5 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

Este trabalho divide-se em seis capítulos. O primeiro capítulo, de introdução, será destinado a contextualizar a evolução da aviação em conjunto com os estudos da aerodinâmica e dos dispositivos hypersustentadores. O capítulo de número 2 trata da aerodinâmica correlacionada ao voo, aspectos básicos, terceira Lei de Newton, princípio de Bernoulli, chegando a relacionar as forças aerodinâmicas, com destaque para a sustentação, o arrasto, em relação ao fenômeno conhecido como estol. No terceiro capítulo aborda-se a classificação e os tipos de dispositivos hypersustentadores: *flaps*; *slots* e *slats*. Sua localização no aerofólio, como alteram o perfil do aerofólio e sua influência diante das forças aerodinâmicas. O quarto capítulo perpassa pelas fases críticas do voo, relacionadas com o uso dos dispositivos hypersustentadores, bem como seus benefícios, os quais colaboram na performance da aeronave, diminuem a carga de trabalho dos tripulantes e principalmente são responsáveis por auxiliar quanto à segurança operacional. No capítulo 5, são expostos índices de acidentes, incidentes e de segurança operacional, sendo feita uma análise de como as evoluções tecnológicas têm auxiliado no aumento da segurança de voo. No sexto e último capítulo são feitas as considerações finais.

2 AERODINÂMICA DE VOO

A aerodinâmica, do grego *ἀήρ* (ar) + *δυναμική* (dinâmica), é uma área de estudo da física dos fluidos e seu estudo se dá pela observação da movimentação dos gases, no movimento do ar em relação aos corpos sólidos.

Neste capítulo explicar-se-ão conceitos básicos da aerodinâmica, para que posteriormente seja possível introduzir a influência dos dispositivos hipersustentadores ao voo, os quais abrangem leis e princípios físicos.

Ao se lançar um objeto para cima, seja uma caneta, uma pedra, rapidamente este objeto cai, devido à força da gravidade. Portanto, como pode algo tão grande e pesado como uma aeronave, alçar voo? Basicamente o voo de um avião resume-se em quatro forças: arrasto, peso, tração e sustentação.

Figura 1 - As quatro principais forças do voo



Fonte: AEROFOX ESCOLA DE AVIAÇÃO (2019)

Arrasto é a força aerodinâmica de resistência ao avanço da aeronave, devido ao formato do avião e atrito deste com o ar. Peso é a força resultante da equação apresentada a seguir.

$$\vec{P} = m\vec{g}$$

Onde $\vec{P}$ é a força peso, m é a massa do objeto e $\vec{g}$ a aceleração gravitacional.

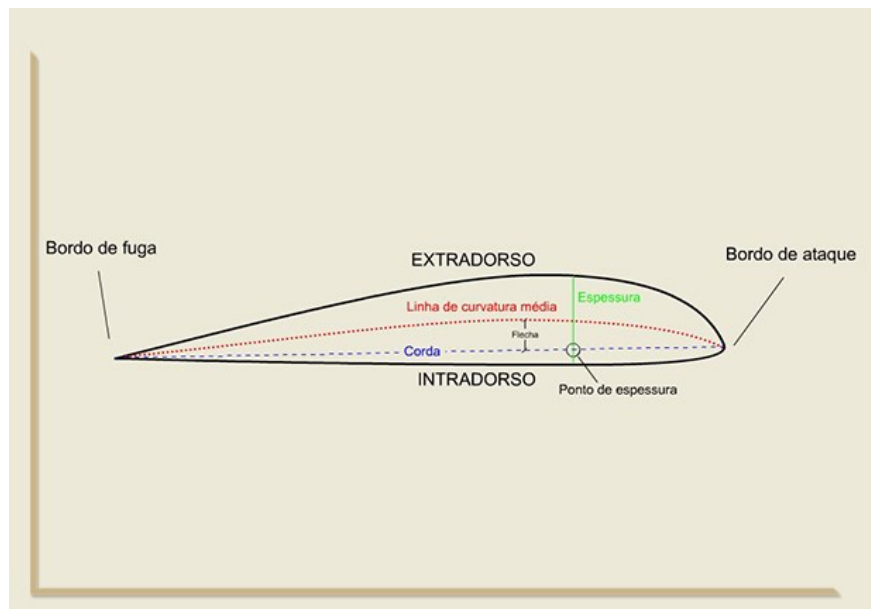
Tração é gerada pelo motor da aeronave. Em aeronaves à hélice, é gerada pelo avanço desse componente em relação ao ar; já em aeronaves a turbina é gerada pelo empuxo gerado pelo jato de exaustão do motor. “Sustentação é a componente da resultante aerodinâmica perpendicular à direção do vento relativo, esta é a força útil do aerofólio”. (HOMA, 2012, p. 22)

2.1 3ª LEI DE NEWTON

A terceira lei de Newton, também conhecida como lei da ação e reação, diz que a toda ação que um corpo exerce sobre um segundo corpo, corresponde uma reação do segundo sobre o primeiro de mesma intensidade e sentido oposto. (NEWTON, 1729, *apud* SHIGUEMATU, 2011).

Para que haja entendimento do modo como esta lei auxilia na sustentação, é necessário primeiro visualizar o perfil de uma asa e conhecer o conceito de ângulo de ataque (α).

Figura 2 - Perfil da asa



Fonte: Hangar 33 (2013)

Conforme ilustrado na figura 2, existe uma linha reta na asa, que segue do bordo de fuga ao bordo de ataque, conhecida como corda. De acordo com Homa (2012), ângulo de ataque (α) é o ângulo formado pela corda com a direção do vento relativo.

Segundo Anderson e Eberhardt (2001), o ar que passa pela asa é encurvado para baixo, em um fenômeno conhecido como “*downwash*”. Assim seguindo a terceira lei de Newton, como reação, o ar exerce força de igual intensidade na asa, porém em sentido contrário, para cima, gerando sustentação. Aplicando a fórmula da força.

$$\vec{F} = m\vec{a}$$

Tem-se que, quanto maior for a quantidade ou massa (m) de ar deslocado, ou, quanto maior a velocidade ou aceleração ($\vec{a}$) deste deslocamento, gerado pelo aumento de

velocidade da aeronave, maior será a força de empuxo no ar e consequentemente maior sustentação.

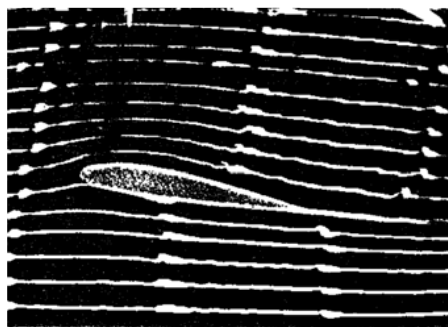
Ainda há a possibilidade de aumentar o “*downwash*” e sustentação sem aumentar a velocidade da aeronave, por meio do aumento do ângulo de ataque. O ar sai pelo bordo de fuga em um ângulo aproximadamente igual ao ângulo de ataque e em velocidade semelhante à da aeronave, ou seja, quanto maior o ângulo de ataque, maior o ângulo de deflexão do “*downwash*”. (ANDERSON; EBERHARDT, 2001)

2.2 PRINCÍPIO DE BERNOULLI

Segundo a descrição de Rodrigues (2009), ao passar pela asa, o ar devido a sua viscosidade, adere ao perfil do aerofólio escoando de forma laminar e criando sustentação. Para entender como isso acontece é importante saber o princípio de Bernoulli: em um fluxo de fluido, pontos de velocidade de fluido mais alta terão menor pressão estática que pontos de velocidade de fluido mais baixa. (BERNOULLI, 1738, *apud* MIKHAILOV, 2005).

Observa-se na figura 3 como o princípio funciona na prática. Já exemplificado no esquema presente na figura 2, visualiza-se que o extradorso da asa apresenta concavidade maior ou mais acentuada que seu intradorso, portanto como representado na figura 3, as linhas de corrente de ar que fluem sobre o aerofólio chegam antes ao bordo de fuga do que a parcela de ar que flui pelo intradorso. (DAHMEN; STUDART, 2006).

Figura 3 - Escoamento do ar através do aerofólio em um túnel de vento



Fonte: DAHMEN; STUDART (2006)

Como dito por Weltner (1990), sendo a distância percorrida pelo ar sobre a asa maior que a distância percorrida pelo ar sob a asa, significa dizer também que a velocidade da passagem de ar no extradorso é maior que no intradorso. Assim aplicando o princípio de

Bernoulli, tem-se que a pressão estática no intradorso é maior que no extradorso, criando sustentação e empurrando a asa para cima.

Ressalta-se neste caso, a equação aplicada:

$$P + \left(\frac{1}{2}\right)\rho v^2 = \text{constante}$$

Onde P é a pressão, ρ a densidade do ar e v a velocidade.

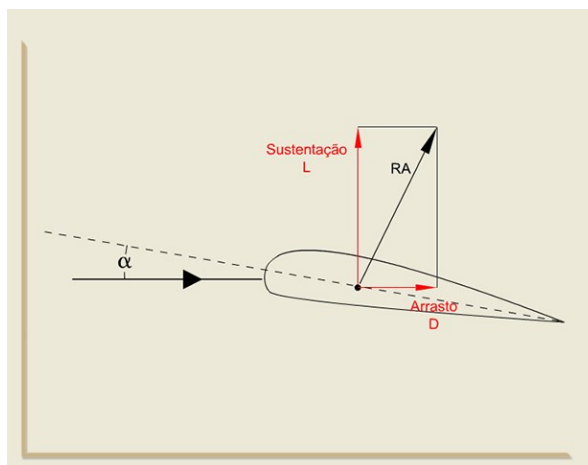
2.3 SUSTENTAÇÃO, ARRASTO E ESTOL

Conhecendo-se como uma asa gera sustentação ou força útil ao voo, relaciona-se aquela com as demais forças aerodinâmicas, bem como com os fatores que influenciam as tais forças; assim entender-se-á como uma aeronave voa e a aplicação dos dispositivos hipersustentadores.

Exposto por Silva (2016), ao mover-se para frente, o avião sofre com o ar que escoar por seu entorno, porém em sentido oposto. Este ar pode ser chamado de vento relativo, ele é o responsável pela RA (Resultante Aerodinâmica), a força que atua sobre o aerofólio empurrando a asa para cima e para trás.

No que concerne às forças aerodinâmicas que atuam sobre o perfil do aerofólio, a resultante aerodinâmica é dividida em duas componentes: sustentação (L – Lift) e arrasto (D – Drag). (SILVA, 2013)

Figura 4 - Resultante aerodinâmica



Fonte: Hangar 33 (2013)

Descrito pela FAA - Federal Aviation Administration (2016), alça-se voo quando a força de sustentação é maior que a força peso, elevando a aeronave, porém não se pode

depender somente de vento. Por este motivo a força de tração torna-se importante, fazendo com que haja vento relativo e vencendo a força de arrasto para que o avião voe para frente e para cima. Em voo reto, horizontal e nivelado, as quatro forças mantêm-se compensadas.

Interessante observar as fórmulas da sustentação e do arrasto respectivamente.

$$L = \frac{C_l \cdot \rho \cdot V^2 \cdot S}{2}$$

Onde L é sustentação, C_l o coeficiente de sustentação, ρ a densidade do ar, V a velocidade e S a área da asa. O C_l “é um número que indica a capacidade de um aerofólio produzir sustentação. O valor de C_l é determinado através de testes em túnel de vento e **depende do formato do aerofólio e do ângulo de ataque**”. (HOMA, 2012, p.24, grifo do autor).

$$D = \frac{C_d \cdot \rho \cdot V^2 \cdot S}{2}$$

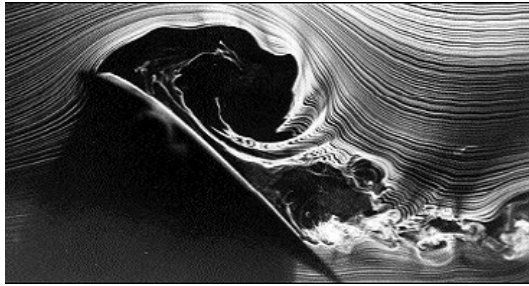
Onde D é arrasto, C_d o coeficiente de arrasto, ρ a densidade do ar, V a velocidade e S a área da asa. Bem como na fórmula da sustentação, na fórmula do arrasto, o ângulo de ataque e o formato do aerofólio também são fatores definitivos do coeficiente de arrasto. (HOMA, 2012)

Verifica-se por meio destas fórmulas a relevância da velocidade para sustentação e arrasto, visto que ambos os casos são proporcionais ao quadrado da velocidade.

Conforme dito pela FAA (2016), o estol ocorre quando há o descolamento da camada limite do perfil do aerofólio, alterando assim a forma física desta camada limite, passando de um escoamento laminar, para um escoamento turbulento. Assim, “[...] o escoamento ao redor de um corpo pode ser dividido em duas regiões: uma camada fina ao redor do corpo chamada de camada limite [...]”. (FREIRE, 1990, apud SCHLICHTING, 1979 p. 1)

Ainda de acordo com a FAA (2016), para compensar a perda de sustentação devido ao descolamento da camada limite, há a necessidade de aumentar-se o ângulo de ataque, porém o aumento do ângulo de ataque possui um limite, chamado de ângulo de ataque crítico (α_{crit}), aonde é atingido o coeficiente de sustentação máximo (C_{l-MAX}). Ao passar deste limite o arrasto aumenta rapidamente e há perda de sustentação, ocorrendo assim, o estol.

Figura 5 - Descolamento da camada limite e escoamento turbulento



Fonte: UNESP (2008)

3 CLASSIFICAÇÃO E TIPIFICAÇÃO DOS DISPOSITIVOS HIPERSUSTENTADORES

Com a evolução dos estudos sobre aerodinâmica, as aeronaves e tecnologias, foram sendo aprimoradas, auxiliando na própria performance dos aviões, das operações, bem como dos tripulantes. Inúmeras foram as tecnologias aprimoradas, como sistemas de combustível, motores mais eficientes, materiais mais leves e mais resistentes utilizados na construção das aeronaves, sistemas de piloto automático, modernos sistemas de navegação por GPS (*Global Positioning System*), entre muitos outros, com destaque neste trabalho para os dispositivos hipersustentadores.

Este capítulo baseia-se na classificação adotada pela FAA (2016), posto que, não obstante existirem outras importantes autoridades aeronáuticas, a escolha daquela se dá por sua relevância enquanto órgão regulador. Precede-se aqui a abordagem da utilização e dos benefícios provenientes dos dispositivos hipersustentadores, pois torna-se importante visualizar quais são estes dispositivos e os seus tipos.

“A hipersustentação é obtida através de: *flaps*; *slots*; *slats*.” (HERMINE, 2008, p. 338)

3.1 FLAPES

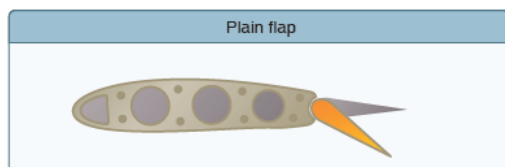
Descrito por Hermine (2008), os flapes são dispositivos acoplados ao bordo de fuga da asa, sendo eles superfícies móveis que correspondem por 15% a 25% da corda. Ao defletir o flape, há um aumento da curvatura do perfil e da corda. Com isto, há incremento do ângulo de ataque efetivo e do coeficiente de sustentação. Também há flapes de bordo de ataque, os quais, em conjunto com outros tipos de flape, além de colaborarem com o aumento da curvatura do aerofólio, ajudam aumentando a sua área.

3.1.1 Flape Simples

Segundo apresenta a FAA (2016) é o modelo mais simples de flape. Com tal dispositivo, há um aumento na curvatura da asa, em dado ângulo de ataque resulta em aumento significativo do coeficiente de sustentação. Ao passo que aumenta a sustentação, o flape simples também aumenta o arrasto, devido à localização no bordo de fuga da asa. Ao ser

utilizado, oferece maior resistência ao vento relativo na parte posterior do aerofólio, com tendência a diminuir o ângulo de ataque e consequentemente baixar o nariz da aeronave.

Figura 6 - Flape simples

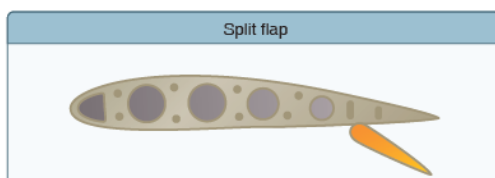


Fonte: FAA (2016)

3.1.2 Flape Ventral

Segundo Hermine (2008), o flape ventral é defletido a partir do intradorso do aerofólio, assim gerando um pouco mais de sustentação em comparação ao flape simples. Sua extensão acaba por criar uma turbulência no ar atrás da asa, portanto, produzindo mais arrasto. Ambos, flape simples e flape ventral, quando totalmente estendidos, produzem muito arrasto com uma pequena adição de sustentação.

Figura 7 - Flape ventral



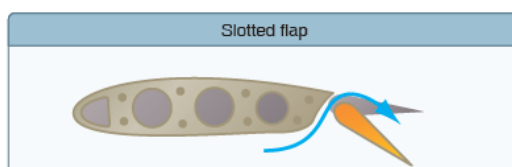
Fonte: FAA (2016)

3.1.3 Flape com Fenda ou Flape “Slotado”

Mencionado por Paula (2017), no comparativo com os flapes simples e ventral, os flapes “slotados” apresentam significativo aumento no coeficiente de sustentação, além de que, devido às adaptações no seu *design*, podem ser utilizados tanto em aeronaves de pequeno, como de grande porte. A dobradiça é localizada logo abaixo da superfície inferior do flape; quando este é baixado, forma um duto de passagem de ar entre a asa e o bordo de ataque do flape. Sendo assim, a fenda criada pelo flape “slotado” possibilita que ar com grande energia passe da superfície inferior do aerofólio para a parte superior do flape. Esta parcela de ar com grande energia acelera o fluxo no extradorso, retardando o descolamento da

camada limite e provendo maior coeficiente de sustentação. Existem algumas variações na construção e no *design* dos flapes com fenda nas grandes aeronaves; há flapes com duas e até três fendas, isso permite que mesmo criando grande arrasto, não haja descolamento do fluxo de ar em cima dos flapes, nem perda da sustentação criada por sua atuação.

Figura 8 - Flape com fenda ou flape "slotado"

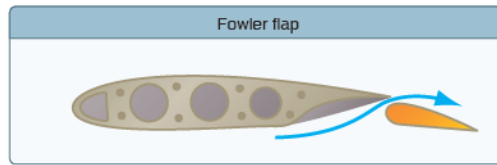


Fonte: FAA (2016)

3.1.4 Flape *Fowler*

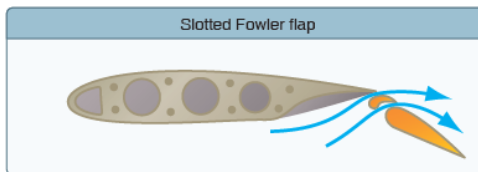
De acordo com a classificação de dispositivos hipersustentadores pela FAA (2016), o flape *Fowler* é uma variação de flape com fenda, porém no caso do flape *Fowler* não há somente alteração na curvatura do aerofólio, há ainda o aumento da área da asa. Ao invés de rotacionar no eixo de uma dobradiça, esse tipo de flape desliza para trás sobre trilhos. A extensão de um flape recebe uma numeração de posições, que vai de totalmente recolhido a totalmente estendido; geralmente estas posições seguem os graus de extensão em relação a posição da asa, por exemplo 15°, 30°, 45°, que também podem ser chamadas de configurações de flape. Sendo assim, o flape *Fowler* nas primeiras posições de extensão gera muito pouco arrasto, mas cria bastante sustentação, já que aumenta tanto a curvatura como a área da asa.

É interessante notar que dependendo da aeronave, ao estender qualquer tipo de flape, existe tendência de o nariz do avião subir ou descer devido a alteração no formato do aerofólio. Ao seguir estendendo, o flape *Fowler* não só mantém deslizando para trás, mas também é direcionado para baixo, gerando maior resistência ao vento relativo e consequentemente maior arrasto, tanto que nas últimas configurações há grande aumento de arrasto com pequenas adições na sustentação.

Figura 9 - Flape *Fowler*

Fonte: FAA (2016)

Visando-se maior eficiência, há ainda uma combinação do flape *Fowler* com o flape “slotado”.

Figura 10 - Flape *Fowler* "slotado"

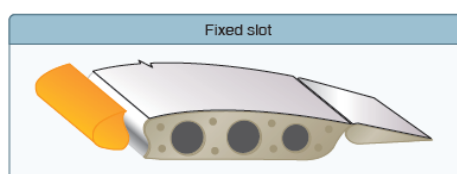
Fonte: FAA (2016)

3.2 DISPOSITIVOS HIPERSUSTENTADORES DE BORDO DE ATAQUE

Além da instalação e utilização dos flapes no bordo de fuga das asas, há a possibilidade de ter-se dispositivos hipersustentadores no bordo de ataque, conforme os tipos a seguir expostos.

3.2.1 *Slot*

Os *slots* são dispositivos fixos que, em grandes ângulos de ataque, direcionam o fluxo de ar para o extradorso do aerofólio, retardando assim o descolamento da camada limite. Apesar de não aumentarem a curvatura da asa, permitem maior coeficiente de sustentação, pois atrasam a ocorrência do estol, possibilitando maiores ângulos de ataque. (FAA, 2016)

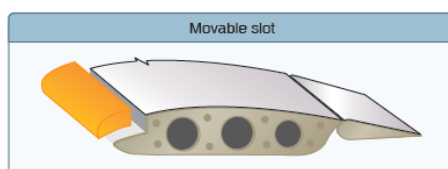
Figura 11 - *Slot*

Fonte: FAA (2016)

3.2.2 Slat

Ainda exposto pela FAA (2016), os *slats* são segmentos do bordo de ataque, os quais atuam pela ação de molas ou deslizando sobre trilhos. Devido à pressão exercida no bordo de ataque pelo vento relativo, os *slats* permanecem recolhidos em pequenos ângulos de ataque. Aumentando-se o ângulo de ataque, distribui-se a pressão antes exercida no bordo de ataque ao longo do intradorso da asa, assim permitindo que os *slats* desloquem-se para frente. No entanto, existem *slats* que independem da baixa pressão no bordo de ataque para atuarem, isso porque são comandados pelo piloto e podem ser deflagrados em qualquer ângulo de ataque. A abertura dos *slats* permite o ar que segue por baixo da asa fluir sobre esta, colaborando na manutenção da camada limite. Os *slats* são como *slots*, porém móveis.

Figura 12 - Slat

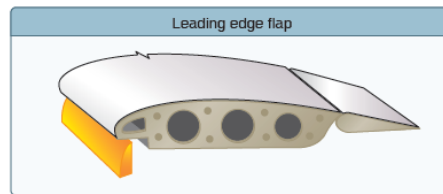


Fonte: FAA (2016)

3.2.3 Flapes de Bordo de Ataque

Os flapes de bordo de ataque são utilizados para aumentar o coeficiente de sustentação máximo e a curvatura do aerofólio, assim como os flapes instalados no bordo de fuga. Frequentemente este tipo de dispositivo é utilizado em conjunto com os flapes de bordo de fuga, pois além das suas funções primárias, colabora ao evitar a tendência demasiada de abaixar o nariz da aeronave causada pelos flapes de bordo de fuga. Assim como os flapes na parte posterior da asa, o aumento da sustentação é muito maior do que o aumento do arrasto no início da extensão dos flapes de bordo de ataque. Conforme se prossegue com a extensão, o arrasto aumenta em uma razão maior que a sustentação. (PAULA, 2012).

Figura 13 - Flape de bordo de ataque

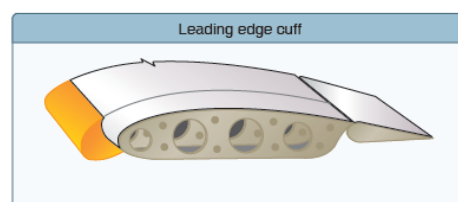


Fonte: FAA (2016)

3.2.4 Protuberância de Bordo de Ataque

A protuberância no bordo de ataque tem como funções as mesmas dos flapes de bordo de fuga e dos flapes de bordo de ataque: aumentar a curvatura das asas e também o coeficiente de sustentação máximo. Como diferença dos flapes, a protuberância no bordo de ataque é um dispositivo aerodinâmico fixo. Na maioria dos casos é uma extensão do bordo de ataque para frente e para baixo, fazendo com que o fluxo de ar tenha melhor aderência ao extradorso do aerofólio em grandes ângulos de ataque, assim diminuindo a velocidade de estol do avião. Em contrapartida, por serem dispositivos fixos, há uma perda na velocidade máxima de cruzeiro, mas recentes avanços em *design* e tecnologia tem reduzido essa penalidade. (NASA, 1979).

Figura 14 - Protuberância de bordo de ataque



Fonte: FAA (2016)

4 USO E BENEFÍCIOS DOS DISPOSITIVOS HIPERSUSTENTADORES

Ao entender-se como a aerodinâmica afeta e permite o voo, e conhecendo-se os diferentes tipos de dispositivos hipersustentadores, há possibilidade de esclarecer quando são utilizados e os benefícios que trazem durante a operação aérea.

4.1 FASES CRÍTICAS DO VOO

Tratar-se-ão aqui as fases críticas do voo, momentos estes quando são aplicados os dispositivos hipersustentadores. Com relação aos dispositivos hipersustentadores fixos, a exemplo dos *slots*, estão em uso durante todo o voo, porém tem maior relevância justamente nas fases críticas, quando aproveitam-se mais dos seus benefícios. De acordo com a IS 91-001 de 2017 e o RBAC 135 de 2019, sobre as fases críticas do voo, a ANAC expõe: “São as fases nas quais a carga de trabalho e o nível de atenção requerido são notadamente elevados. Incluem as operações de táxi, procedimentos de decolagens e aproximações e sempre que as aeronaves estiverem abaixo de 10.000 pés de altura.” (BRASIL, 2019). Conforme o CIRCEA 100-80 de 2018, o DECEA dispõe no item 5.4.4: “Não interferir nos trabalhos da tripulação, notadamente nas fases críticas do voo (pousos e decolagens).” (BRASIL, 2018). Verifica-se assim que as fases críticas do voo são aquelas de proximidade ao solo. A própria fórmula da sustentação nos mostra que a velocidade é fator de maior importância na criação da força de sustentação, portanto fica claro que as fases críticas se tornam ainda mais críticas devido às baixas velocidades, tanto devido à inércia do início da corrida de decolagem, quanto à necessidade de pousar em baixas velocidades.

4.2 BENEFÍCIOS DOS DISPOSITIVOS HIPERSUSTENTADORES

Como a própria nomenclatura remete, o objetivo dos dispositivos hipersustentadores é colaborar na criação da força de sustentação, melhorando assim a aerodinâmica das aeronaves e auxiliando os pilotos durante as fases críticas.

Inicialmente tratar-se-ão os benefícios referentes à performance das aeronaves, para que posteriormente seja mais claro o entendimento dos benefícios indiretos ao uso dos dispositivos de hipersustentação.

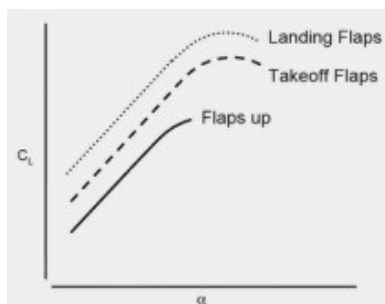
4.2.1 Benefícios de Performance

Os benefícios de performance são aqueles referentes ao uso direto dos dispositivos hipersustentadores, ou seja, são os que influenciam nos cálculos de performance da aeronave, possibilitando assim a escolha do melhor grau de aplicação destes dispositivos para pousos e decolagens, além do aumento na capacidade de peso do avião conforme necessidade.

4.2.1.1 Performance de decolagem e peso

“O emprego do flape aumenta os coeficientes de sustentação e de arrasto. Com ele as velocidades de rotação, de *lift off* e de decolagem serão menores, e maior o arrasto do avião.” (SAINTIVE, 2013, p. 106).

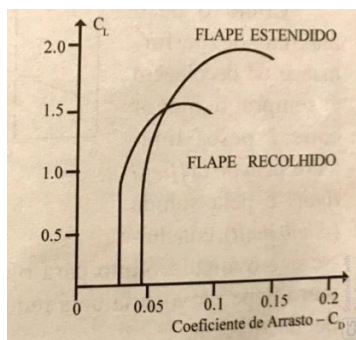
Figura 15 - Relação coeficiente de sustentação, ângulo de ataque e uso de flapes



Fonte: AeroDesign Magazine (2010)

Apesar de gerar resistência ao avanço (arrasto) e redução na aceleração da aeronave, percebe-se através da figura acima e da figura abaixo que o aumento no coeficiente de sustentação é maior que o aumento no coeficiente de arrasto ao estender os flapes. Sendo sustentação a força inversa ao peso, consegue-se decolar com menor velocidade. Em consequência disso utiliza-se menor comprimento de pista ou troca-se essa economia de pista por maior carga alar.

Figura 16 - Relação coeficiente de sustentação, coeficiente de arrasto e uso de flapes



Fonte: Saintive (2013)

Apontado por Gamboa (2008), ângulo de subida é o ângulo formado entre a trajetória da aeronave e a linha do horizonte. Entende-se que uma aeronave ao consumir menor comprimento de pista para decolar, sobe com maior ângulo de subida, ainda assim há de se verificar a influência do flape na trajetória de subida.

A trajetória de decolagem abrange o momento em que o avião atinge 35 pés de altura até 1500 pés de altura ou até que os dispositivos hipersustentadores estejam na configuração para voo de cruzeiro, o que for mais alto. Nesta trajetória a aeronave deverá cumprir gradientes mínimos de subida por questões como altitude de segurança, ultrapassagem de obstáculos, regras de tráfego aéreo, redução de ruído, entre outros. O cumprimento dos gradientes de subida segue a fórmula a seguir:

$$\frac{T - D}{W}$$

Sendo T a tração, D o arrasto e W o peso. O único fator da fórmula influenciado pelo uso de flape é o arrasto, portanto quanto maior o ângulo de flape maior o arrasto e menor o gradiente de subida alcançado pelo avião. (SAINTIVE, 2013).

Com o exposto acima demonstra-se que uma aeronave tem a possibilidade de ajustar o flape conforme a limitante do peso máximo de decolagem (PMD), operando assim em diferentes aeroportos com diferentes características.

4.2.1.2 Performance de pouso

O avião atinge uma velocidade mínima antes que haja perda de sustentação, a denominada velocidade de estol. Baseando-se na fórmula da força apresentada na seção 2.1 do capítulo 2, para uma mesma massa quanto menor a aceleração, menor será a força. Assim, para dois aviões com o mesmo peso, aquele que aproximar com menor velocidade utilizando

a mesma força de frenagem, irá consumir menor comprimento de pista. No entanto, observa-se que a redução de velocidade de aproximação e pouso está limitada pela velocidade de estol e que a velocidade de estol é tanto menor quanto maior for o coeficiente de sustentação. Para aumentar este coeficiente e reduzir a velocidade de estol, usam-se dispositivos hipersustentadores. (SAINTIVE, 2013)

Do mesmo modo que durante a decolagem, há limitantes de performance aerodinâmica e peso durante o pouso, tanto pelo comprimento de pista quanto pela trajetória de arremetida.

Conforme a Boeing (2000) expõe no manual de um modelo específico da aeronave 737-300, para uma pista com 2200 metros, molhada, considerando vento calmo, altitude do aeroporto a 8000 pés e aeronave em configuração de flape 15, o peso máximo de pouso (PMP) limitado pelo comprimento de pista é de aproximadamente 50 toneladas. Para a mesma situação, alterando somente a configuração de flape para 40, a limitante de peso é alterada para mais de 56 toneladas.

Da mesma forma que na trajetória de decolagem, durante uma arremetida a aplicação de mais flape diminui o limite de PMP, pois diminui a capacidade da aeronave em atingir o gradiente mínimo de subida. A Boeing (2000) exemplifica no manual do 737-300 essa limitante por meio de um gráfico com a aplicação da configuração de flape 40. Logo após o gráfico, em nota, explica que, para as configurações de flape 30 e 15, o limite de peso restrito pela trajetória de arremetida aumenta para 1800kg e 4700kg respectivamente. Prova-se, assim, que os flapes possibilitam ajustes para pouso, caso haja necessidade de se utilizar pistas mais curtas e quando há sobra de pista possibilitam aumento no PMP.

Mencionado anteriormente no capítulo 3, ao se utilizar flapes há tendência de a aeronave abaixar o nariz, com isso diminui-se o ângulo de ataque crítico. Apesar de ocorrer de modo geral aumento no coeficiente de sustentação, perde-se parte da sustentação gerada pela diminuição do ângulo e, dessa forma para que se minimize tal perda e se aumente o ângulo de ataque crítico, são aplicados os dispositivos hipersustentadores de bordo de ataque, principalmente *slots* e *slats*, os quais auxiliam na manutenção da camada limite no extradorso do aerofólio.

Outro benefício que os dispositivos hipersustentadores oferecem durante o pouso é a capacidade de servirem como freio aerodinâmico, apesar de gerarem grande coeficiente de sustentação, mesmo em aeronaves que possuam flape *Fowler*. A frenagem da aeronave ocorre principalmente pelo atrito do pneu com a pista, com isso os flapes, ao criarem sustentação, dificultariam a frenagem. Para isso existem dispositivos instalados no extradorso da asa,

conhecidos como *spoilers*, cuja função é desviar o fluxo de ar para cima e impedir sua passagem sobre toda a extensão do extradorso do aerofólio, quebrando assim a sustentação e gerando grande arrasto. Sendo assim, anulam-se os efeitos de sustentação dos flapes, mantendo apenas o arrasto, em consequência auxiliando na parada da aeronave. (FAA, 2016).

4.2.2 Benefício Indiretos

Além dos benefícios para os quais foram concebidos, os dispositivos hipsustentadores trazem outros benefícios indiretos da sua utilização.

Quando se decola com peso menor do que aquele que seria o limite máximo, atingindo assim os requisitos mínimos com sobra, ou seja, comprimento mínimo de pista requerido para parada da aeronave em caso de se abortar a decolagem; os requisitos de altura mínima para livrar o risco de colisão com obstáculos; mínimos de performance para atingir-se a altitude mínima de segurança em caso de necessidade de retorno ou falha de motores. Tem-se a disponibilidade de decolar com a tração dos motores reduzida. Saintive (2013) brevemente explica que a tração reduzida é aplicada por meio de tabelas as quais assumem temperaturas no aeródromo maiores que as reais, portanto ao induzir os motores a aplicarem tração máxima em uma temperatura ambiente maior, faz com que, face à temperatura real, a tração não seja a máxima real do motor, realizando uma operação mais branda e economizando na vida útil do motor, componentes e combustível. Principalmente quando o PMD é limitado pelo comprimento de pista, aplica-se maior extensão de flape e realiza-se decolagem com temperatura assumida.

Considerando a economia de combustível e as forças aerodinâmicas atuantes no voo, os dispositivos hipsustentadores auxiliam a economizar combustível durante as aproximações para pouso. A própria fórmula da sustentação expõe que a velocidade é o fator mais significativo, posto que para manter a sustentação, seria necessário realizar aproximações em altas velocidades, prejudicando os freios e aumentando o comprimento de pista necessário para a parada da aeronave. Em contrapartida, há possibilidade de aumentar a tração e elevar o ângulo de ataque, fazendo com que parte da força peso seja contraposta pela tração e haja incremento de tração a ponto de tornar muito alto o consumo de combustível. Visualiza-se na tabela 1, que com o uso dos dispositivos hipsustentadores e o aumento no coeficiente de sustentação gerado por eles, obtém-se a capacidade de reduzir a velocidade de uma grande aeronave como o Airbus A320neo entre 45 e 50 nós, com incrementos de apenas 2% da potência total do motor.

Tabela 1 – Relação atitude da aeronave, potência e uso dos dispositivos hipersustentadores de modelo específico do Airbus A320neo

PITCH / THRUST FOR LEVEL OFF				
		70 t 155 000 lb	60 t 130 000 lb	50 t 110 000 lb
SLATS / FLAPS EXTENDED				
CONF	PITCH	THRUST % N1 (Resultant speed)		
3	7°	56% (150 kt)	52% (140 kt)	48% (125 kt)
2	5.5°	54% (165 kt)	52% (155 kt)	46% (140 kt)
1+F	5°	54% (180 kt)	50% (170 kt)	46% (155 kt)
1	6.5°	54% (200 kt)	50% (185 kt)	46% (170 kt)

Fonte: Flight Crew Operating Manual (FCOM) Airbus A320neo – AIRBUS (2017)

Além dos benefícios supracitados, o uso dos dispositivos hipersustentadores permite menor carga de trabalho aos tripulantes e otimização do espaço aéreo. Júnior (2018) cita os elevados níveis de carga de trabalho durante as fases críticas do voo e a influência do aumento substancial da carga de trabalho no *cockpit* ao processo decisório e de julgamento. O tripulante, quando em alta carga de trabalho, está suscetível à diminuição da capacidade mental, pondo em risco a segurança operacional. (DUVAL NETO, 2006). Portanto, ao serem realizadas operações em velocidades menores devido ao uso dos dispositivos de hipersustentação, é minimizada a carga de trabalho e em consequência disso adquire-se mais tempo e capacidade na tomada de decisão para a execução das ações com maior precisão. Ainda considerando as operações com velocidades reduzidas, otimiza-se o espaço aéreo, principalmente em aeroportos com grande movimentação como é o caso do Aeroporto de Guarulhos em São Paulo. A possibilidade de redução na velocidade das operações diminui a carga de trabalho dos controladores de tráfego aéreo, adequando a velocidade das operações conforme necessidade, permitindo melhores decisões e acomodando maior número de voos.

5 DISPOSITIVOS HIPERSUSTENTADORES NO CONTEXTO DA SEGURANÇA OPERACIONAL

Muitos são os fatores contribuintes aos acidentes e, nesse contexto é interessante considerar o modelo de Reason (1997) descrito por Jasper e Prado (2015, p.41):

“O modelo de Reason (1997), conhecido como “Queijo Suíço” ou teoria das causas múltiplas, não defende uma causa única como desencadeadora de uma sequência de eventos que levaria ao acidente, mas combinações lineares de condições latentes e falhas ativas que constituem várias cadeias e, após ultrapassarem as barreiras de segurança pelo alinhamentos de suas vulnerabilidades, culminam no acidente [...]”

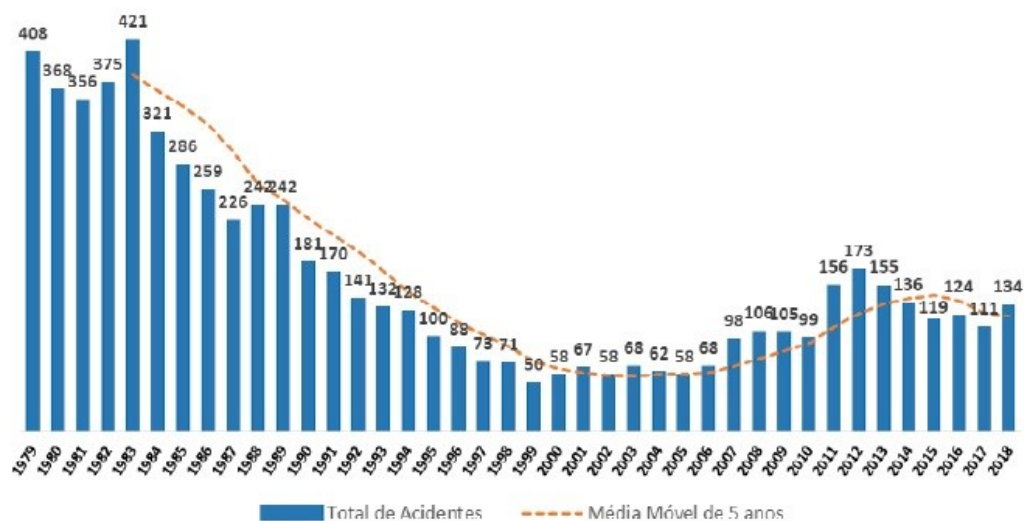
Nesse sentido, não se atribuem como únicos dispositivos de segurança, os dispositivos hipersustentadores. No entanto, devido a série de benefícios do uso destes dispositivos, pode-se dizer que contribuem no aumento da segurança operacional, o que fica claro ao analisar os índices de acidentes conforme evolução histórica, tipo de operação, tipo de aeronave e a importância da contribuição em fases críticas.

Considera-se para esta análise o panorama nacional, por meio dos relatórios e dados estatísticos expedidos pela Agência Nacional de Aviação Civil (ANAC) e pelo CENIPA (Centro de Investigação e Prevenção de Acidentes Aeronáuticos).

5.1 QUANTIDADE DE ACIDENTES

Para análise dos índices de segurança operacional, é interessante observar a quantidade do total de acidentes em número absolutos, apresentada entre os anos de 1979 e 2018 no gráfico 1.

Gráfico 1 – Histórico de acidentes da aviação civil brasileira



Fonte: ANAC e CENIPA (2018)

Percebe-se redução no total de acidentes de 1979 até o ano 2000, acompanhando a evolução tecnológica das aeronaves e sistemas empregados na aviação. A partir do ano 2000, os números mantêm-se com pequenas variações para mais até o ano de 2006, quando então há crescimento significativo na quantidade total de acidentes até 2012, ano em que os índices voltam a cair.

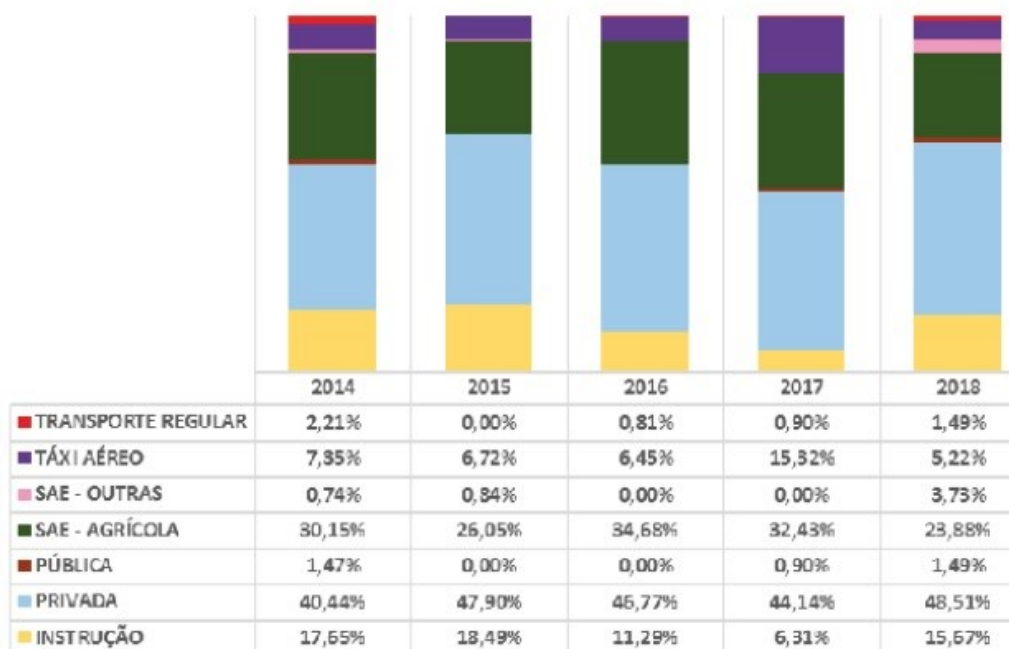
Relacionando o número total de 58 acidentes em 2000, com a quantidade de acidentes nos anos posteriores, não faria sentido o aumento no índice em relação ao desenvolvimento tecnológico aplicado no setor porém; tratando-se de números absolutos deve-se observar também o aumento na quantidade de operações. Segundo a Confederação Nacional do Transporte (CNT), houve crescimento no número de passageiros de 210,8% entre os anos 2000 (32,92 milhões de pessoas por ano) e 2014 (102,32 milhões de passageiros). Número que, de acordo com a ANAC, cresceu para mais de 103 milhões de passageiros somente no transporte aéreo regular (TPR) em 2018. Além do crescimento na demanda pelo transporte aéreo, ainda segundo a ANAC por meio do Registro Aeronáutico Brasileiro (RAB), verifica-se o aumento na quantidade de aeronaves com registro privado (TPP) de 7.228 em 2009 para 10.360 em 2019.

5.2 ACIDENTES POR TIPO DE OPERAÇÃO E POR TIPO DE AERONAVE

Como citado anteriormente, um acidente não ocorre devido a uma causa única; na verdade é fruto de um conjunto de fatores e, nesse contexto, ao se observarem os gráficos dos

acidentes por tipo de operação e por tipo de aeronave, justificam-se os benefícios à segurança operacional do uso dos dispositivos hipersustentadores.

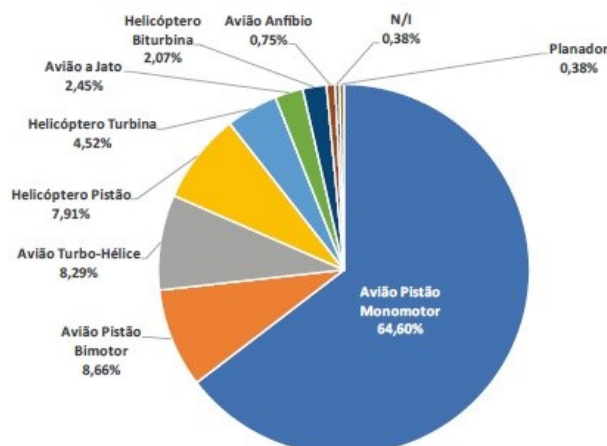
Gráfico 2 – Participação dos tipos de operação no total de acidentes – 2014 a 2018



Fonte: CENIPA (2018)

Apesar de variações como em 2017, quando o táxi aéreo foi responsável por 15,32% do total de acidentes contra 6,31% da instrução, observa-se a manutenção de uma média correspondente ao tipo de operação, a qual sempre manteve a aviação privada em primeiro lugar no total de acidentes. Enquanto o transporte regular, apresentou bons índices de segurança, mesmo com grande número de operações.

Gráfico 3 – Participação dos tipos de aeronave no total de acidentes – 2014 a 2018



Fonte: ANAC e CENIPA (2018)

O gráfico demonstra que as aeronaves na categoria avião com motor a pistão, representam mais de 70% do total de acidentes, contra apenas 8,29% dos aviões turbo-hélice e quase inexpressivos 2,45% dos aviões a jato.

Analisando ambos os gráficos expostos nesta seção, percebe-se através de um olhar voltado para o viés tecnológico, que as aeronaves a jato, das quais podemos citar as fabricadas pela Airbus (A32F), Boeing (737) e Embraer (190/195), revelam melhores índices de segurança. Apesar de serem projetos mais complexos, apresentam maior número de redundâncias quanto aos quesitos de segurança, possibilitando a aplicação de sistemas mais sofisticados e eficientes, a exemplo do flape *Fowler*.

Em contrapartida, aeronaves com motor a pistão são menos complexas, empregando menos tecnologia — em muitos casos ausência de dispositivos hipersustentadores de bordo de ataque e apenas uso de flapes simples. Importante ressaltar que a aplicação de flapes mais sofisticados aumentaria os benefícios às aeronaves com motor a pistão, mas elevaria custos e inviabilizaria o projeto de muitos aviões devido ao peso dos sistemas.

5.3 ACIDENTES DURANTE AS FASES CRÍTICAS

Citado anteriormente, o conceito de fases críticas abrange as fases de voo em proximidade ao solo. Para interpretação dos gráficos a seguir, há relevância no conhecimento da taxonomia utilizada pelo Sistema de Investigação e Prevenção de Acidentes Aeronáuticos - SIPAER (BRASIL, 2018, p. 68) para descrever algumas fases do voo, que se encontram inseridas nas fases críticas:

Corrida após o pouso – Fase de voo que vai do toque até a saída da pista de pouso ou a parada da aeronave, o que acontecer primeiro. Esta fase inclui pouso corrido de helicóptero.

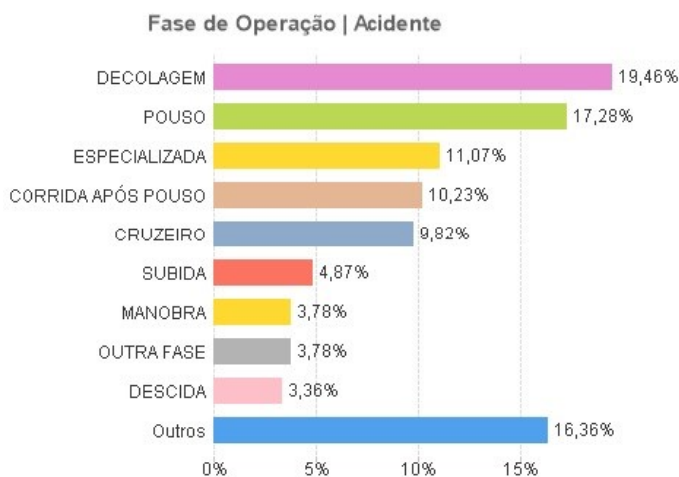
Decolagem – Fase do voo desde a aplicação de potência de decolagem, passando pela corrida de decolagem e rotação ou, no caso de helicóptero, a partir do início de seu deslocamento para iniciar o voo propriamente dito, até 50 pés (15m) acima da elevação do final da pista ou do ponto de decolagem. Esta fase inclui a operação de desaceleração e parada da aeronave no caso de descontinuar (abortar) a decolagem. Nesta fase estão incluídas as decolagens diretas e corridas de helicópteros.

Pouso – Do momento em que a aeronave entra no efeito solo, após a aproximação para pouso, até o toque com o trem de pouso, esquis ou flutuadores, ou até atingir a condição de voo pairado. Esta fase inclui o toque do helicóptero com o solo após o pairado, quando este não é precedido por uma fase de rolagem, ainda que decorrente de emergência.

Subida inicial – Fase do voo desde 50 pés (15m) acima do final da pista ou do ponto de decolagem, até a primeira redução de potência prevista, ou até atingir 1.500 pés

(450m), ou até atingir o circuito de tráfego VFR, o que ocorrer primeiro. Esta fase não inclui a realização de procedimento de saída IFR.

Gráfico 4 – Percentual de acidentes por fase de operação entre 2008 e 2017 – Aviões



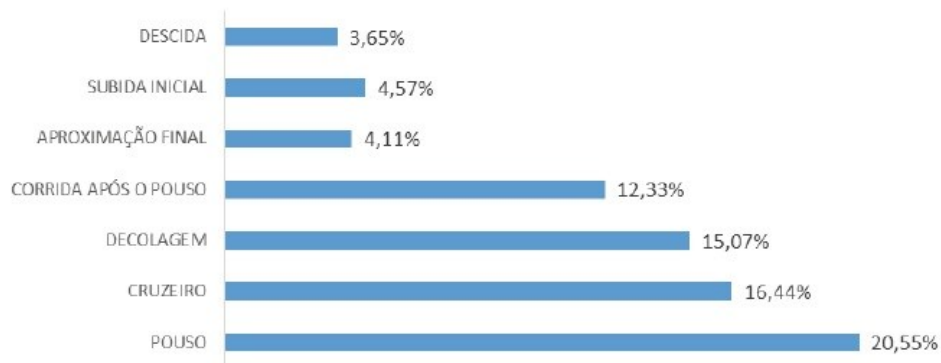
Fonte: CENIPA (2018)

O gráfico 4 demonstra que 46,97% dos acidentes ocorridos com aviões entre 2008 e 2017 aconteceram nas fases de decolagem, pouso e corrida após o pouso, ou seja, quase metade dos acidentes no período se deram apenas nestas três fases. Isso expressa a importância da segurança de voo, da atenção dos pilotos e da tecnologia, o que inclui a aplicação dos dispositivos hipersustentadores, durante estes momentos, quando aumentam os riscos à segurança operacional.

Nesse contexto, o CENIPA (2018) expõe em relatório estatístico a quantidade de ocorrências de saída de pista na aviação civil brasileira entre 2004 e 2018. Nele verifica-se o total de 372 ocorrências, dentre elas, 142 no pouso, 138 na corrida após o pouso e 68 durante a decolagem, enfatizando assim os riscos encontrados durante essas fases.

Tendo em vista que nos últimos cinco anos a aviação privada destacou-se no topo da lista como aviação com maior quantidade de acidentes, torna-se interessante visualizar o gráfico seguinte.

Gráfico 5 – Percentual de acidentes da aviação privada por fase de operação, 2014 a 2018. Para melhor visualização, as fases relacionadas a um pequeno número de acidentes foram suprimidas.



Fonte: CENIPA (2018)

Novamente fica explícita com o somatório de 47,95% dos acidentes ocorridos na aviação privada entre 2014 e 2018, a importância destas três fases, pouso, corrida após o pouso e decolagem, para a segurança operacional. Caso seja inclusa no cálculo a fase de subida inicial, na qual acontece o recolhimento dos dispositivos hypersustentadores após a decolagem, a porcentagem dos acidentes atinge 52,52% do total de ocorrências. Demonstra-se assim a relevância dos estudos sobre aerodinâmica para o desenvolvimento tecnológico dos dispositivos hypersustentadores e seus benefícios em prol da segurança de voo, permitindo a melhora de performance das aeronaves, operação mais branda dos motores, maior tempo de reação dos principais agentes da segurança de voo e otimização do tráfego aéreo. Com esses benefícios há diminuição dos riscos durante as operações aéreas, auxiliando os pilotos quanto ao gerenciamento de cabine e melhor organização por parte dos controladores de tráfego aéreo.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Por meio de uma pesquisa descritiva e abordagem qualitativa, este trabalho objetivou demonstrar de que forma o desenvolvimento e a evolução dos dispositivos hipersustentadores contribuíram para a melhoria da segurança operacional na aviação com o passar do tempo.

Para isto, foram inicialmente explorados conceitos de aerodinâmica, como as forças atuantes no voo, a terceira lei de Newton, o princípio de Bernoulli e a relação entre sustentação, arrasto e o fenômeno da perda de sustentação, conhecido como estol.

Na sequência, descreveram-se os diferentes tipos e classificações dos dispositivos hipersustentadores, flapes de bordo de fuga e as variáveis de dispositivos localizados no bordo de ataque, entre eles, os slots, slats, flapes de bordo de ataque e a protuberância de bordo de ataque.

Posteriormente, expôs-se os benefícios advindos do uso destes dispositivos e em que momento eles são utilizados. Dentre os efeitos, foram observados aqueles do uso direto, ou seja, os efeitos na performance das aeronaves, motivo pelos quais foram desenvolvidos os dispositivos hipersustentadores e os benefícios indiretos, que resultam na economia de combustível, diminuição da carga de trabalho dos pilotos, otimização do espaço aéreo, redução do desgaste dos motores e aumento da segurança operacional.

Por fim, analisaram-se os resultados do desenvolvimento dos dispositivos de hipersustentação em face à segurança operacional. Nesse sentido, percebe-se que com os estudos na área da aerodinâmica e com a evolução tecnológica, houve redução na quantidade de acidentes aéreos em proporção à quantidade de operações, demonstrada em números absolutos dentre os anos de 1979 e 2018, por meio de dados da ANAC e do CENIPA; assim consequente aumento nos índices de segurança operacional, principalmente em operações que envolvem aeronaves mais sofisticadas, como é o caso do transporte aéreo regular e das aeronaves a jato.

Deste modo, pode-se utilizar os conhecimentos aqui apresentados para entender as funções dos dispositivos hipersustentadores e procurar aplicá-los da melhor maneira possível, visando a redução dos riscos de acidentes. Ainda, recomenda-se o contínuo estudo tecnológico para a evolução da aviação, tendo como objetivo a melhora na segurança de voo.

REFERÊNCIAS

ABREU, Hélio Luis Camões de. **Aerodinâmica**. Florianópolis: Aerotd Escola de Aviação Civil, 2015.

AEROFOX ESCOLA DE AVIAÇÃO. **Forças Aerodinâmicas**. 2019. Disponível em: https://pikdo.net/p/voeaerofox/2074184763788672290_8172549084. Acesso em: 05 ago. 2019.

AIRBUS. **Flight Crew Operating Manual A318/A319/A320**. Toulouse: Airbus, 2005.

ANDERSON, David; EBERHARDT, Scott. Como os aviões voam: uma descrição física do voo. In: STUART, Nelson (Ed.). **A Física na Escola**. 7. ed. São Paulo: Sociedade Brasileira de Física, 2006. p. 43-51. (2). Tradução e resumo: S. R. Dahmen.

ANDERSON, David F.; EBERHARDT, Scott. **Understanding Flight**. [s. L.]: Mcgraw-hill, 2001. 240 p.

ANDERSON JUNIOR, John D. **Introduction to Flight**. 7. ed. Nova Iorque, NY: The Mcgraw-hill Global Education Holdings, 2012.

ANTUNES, Camila A.; GALHARDI, Vinícius B.; HERNASKI, Carlos A. **As leis de Newton e a estrutura Espaço-temporal da Mecânica Clássica**. Rev. Bras. Ensino Fís., 2018, vol.40, no.3. ISSN 1806-1117

AVIATION SUPPLIES & ACADEMICS INC. **Aircraft Systems: Flaps**. Disponível em: <http://learntoflyblog.com/2015/10/19/aircraft-systems-flaps/>. Acesso em: 02 set. 2019.

BALANE, Lucas Jorge. **Sustentação Aerodinâmica Baseada no Princípio de Bernoulli: Uma perspectiva didática**. 2017. 62 f. TCC (Graduação) - Curso de Física, Universidade Pedagógica - Moçambique, Gaza, Moçambique, 2017.

BIASI, Fabio Augusto Alvarez. Características do estol nas asas das aeronaves. **Aerodesign Magazine**, São Paulo, v. 2, n. 1, p.1-6. 2010.

BOEING. **Flight Planning and Performance Manual 737-300**. Seattle: Boeing Commercial Airplane Group, 2000.

BOEING. **Performance Manual 737-800**. Seattle: Boeing Commercial Airplane Group, 2002.

BORTOLETO, J. R. R. **Escoamento Laminar e Turbulento**. Sorocaba: Unesp, 2008. 23 p.

BRANDO JÚNIOR, Miguel César. **Operação single-pilot no transporte regular de passageiros no Brasil: Os reflexos na segurança operacional**. 2018. 54 f. TCC (Graduação) - Curso de Ciências Aeronáuticas, Unisul - Universidade do Sul de Santa Catarina, Palhoça, 2018.

BRASIL. Agência Nacional de Aviação Civil (ANAC). **Aeronaves**. 2019. Disponível em: <https://www.anac.gov.br/assuntos/dados-e-estatisticas/aeronaves>. Acesso em: 25 set. 2019.

BRASIL. Agência Nacional de Aviação Civil (ANAC). **Decolagem Certa**. 2014. Disponível em: <http://www2.anac.gov.br/decolagemcerta/>. Acesso em: 26 set. 2019.

BRASIL. Agência Nacional de Aviação Civil (ANAC). **Instrução Suplementar 91-001: Aprovação Operacional de Navegação Baseada em Performance (PBN)**. Brasília: 2017.

BRASIL. Agência Nacional de Aviação Civil (ANAC). **RBAC 135: Requisitos Operacionais: operações complementares e por demanda**. Brasília, 2019.

BRASIL. Agência Nacional de Aviação Civil (ANAC). **Relatório Anual de Segurança Operacional (RASO) – 2018**. 2018. Disponível em: https://www.anac.gov.br/assuntos/paginas-tematicas/gerenciamento-da-seguranca-operacional/arquivos/RASO_2018_v4.pdf. Acesso em: 30 set. 2019.

BRASIL. Assessoria de Comunicação da ANAC. **Mais de 103 milhões de passageiros foram transportados em 2018 por empresas brasileiras**. 2019. Disponível em: <https://www.anac.gov.br/noticias/2019/mais-de-103-milhoes-de-passageiros-foram-transportados-em-2018-por-empresas-brasileira>. Acesso em: 15 ago. 2019.

BRASIL. Centro de Investigação e Prevenção de Acidentes Aeronáuticos (CENIPA). **Aviões – Sumário Estatístico – 2008 a 2017**. 2018. Disponível em: http://sistema.cenipa.aer.mil.br/cenipa/paginas/arquivos/avioes_sumario_estatistico.pdf. Acesso em: 28 set. 2019.

BRASIL. Centro de Investigação e Prevenção de Acidentes Aeronáuticos (CENIPA). **Saída de pista (Runway Excursion) – De 2004 a 2018**. 2018. Disponível em: <http://www2.fab.mil.br/cenipa/index.php/estatisticas/saida-de-pista-runway-excursion>. Acesso em: 28 set. 2019.

BRASIL. Departamento de Controle do Espaço Aéreo (DECEA). **CIRCEA 100-80: Voos de familiarização de cabine de pilotagem das aeronaves para controladores de tráfego aéreo**. Brasília, 2018.

CENTRO DE ENSINO E PESQUISA APLICADA (São Paulo). Universidade de São Paulo. **Força Peso**. Disponível em: http://www.cepa.if.usp.br/e-fisica/mecanica/universitario/cap09/cap09_31.htm. Acesso em: 06 ago. 2019.

CORREIO BRAZILIENSE. **Número de passageiros aéreos cresceu 210% de 2000 a 2014, diz CNT**. Disponível em: https://www.correiobraziliense.com.br/app/noticia/turismo/2015/11/11/interna_turismo,506012/numero-de-passageiros-aereos-cresceu-210-de-2000-a-2014-diz-cnt.shtml. Acesso em: 29 set. 2019.

CROUCH, Tom D. **Asas: Uma história da aviação, das pipas à era espacial**. Rio de Janeiro: Record, 2008.

DUVAL NETO, Gastão Fernandes. **Stress e Fadiga na Segurança do Ato Anestésico: Impacto no Desempenho Profissional**. In: CAVALCANTI, Ismar Lima; CANTINHO, Fernando Antônio de Freitas; ASSAD, Alexandra (Ed.). *Medicina Peri operatória*. Rio de Janeiro: Saerj, 2006.

FABRES, Ana Cristina Porto. **Abrindo a Caixa Preta das Competências: O caso dos pilotos brasileiros de linha aérea na virada do século XXI**. 2013. 166 f. Monografia (Especialização) - Curso de Sociologia, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2013.

FAJER, Márcia. **Sistema de investigação dos acidentes aeronáuticos da aviação geral: Uma análise comparativa**. 2009. 150 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Saúde Pública, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.

FREIRE, Atila Pantaleão Silva. **Teoria de Camada Limite**. Rio de Janeiro: UFRJ, 1990.

GAMBOA, Pedro V. **Forças Aplicadas no Avião**. Covilhã: Universidade de Beira Interior, 2008.

HANGAR 33. **Conheça a geometria básica de uma aeronave**. 2013. Disponível em: <http://blog.hangar33.com.br/conheca-a-geometria-basica-de-uma-aeronave/>. Acesso em: 06 ago. 2019.

HANGAR 33. **Os princípios da aerodinâmica do voo**. 2013. Disponível em: <http://blog.hangar33.com.br/os-principios-da-aerodinamica-do-voo/>. Acesso em: 09 ago. 2019.

HERMINE, Ivan Barbosa. **Teoria de voo de avião para pilotos: Roteiro de estudos**. 589 p. Curso de Aviação Civil, Universidade Anhembi Morumbi, São Paulo, 2008.

HISTORY CHANNEL. **Santos Dumont voa com o 14-Bis em Paris**. Disponível em: <https://br.historyplay.tv/hoje-na-historia/santos-dumont-voa-com-o-14-bis-em-paris>. Acesso em: 18 ago. 2019.

HOMA, Jorge M. **Aerodinâmica e Teoria de Voo: Noções Básicas**. 31. ed. São Paulo: Asa, 2012.

HURT JUNIOR, Hugh Harrison. **Aerodynamics for Naval Aviators**. Los Angeles, CA: University Of Southern California, 1965.

JASPER, Cel. Av. R1 Flavio Neri Hadmann; PRADO, Ten. Cel. Av. Adalberto Santos. A evolução de paradigmas nas investigações de ocorrências aeronáuticas. **Revista da Unifa**, Rio de Janeiro, v. 28, n. 37, p.37-42, dez. 2015.

KHAN ACADEMY (Org.). **O que é a equação de Bernoulli?** Disponível em: <https://pt.khanacademy.org/science/physics/fluids/fluid-dynamics/a/what-is-bernoullis-equation>. Acesso em: 07 ago. 2019.

MIKHAILOV, G. K. Chapter 9 Daniel Bernoulli, Hydrodynamica (1738). In: MIKHAILOV, G. K. **Landmark Writings in Western Mathematics 1640-1940**. Amsterdam: Elsevier, 2005. Cap. 9. p. 131-142.

MOLLON, Bruno Michael. **Análise do Uso de Liga com Efeito Memória de Forma na Atuação do Flape de uma Aeronave Radiocontrolada**. 2017. 72 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade de Caxias do Sul, Caxias do Sul, 2017.

NEWTON, Isaac. **The Mathematical Principles of Natural Philosophy**. Londres: Benjamin Motte, 1729.

OLIVEIRA, Pedro Magalhães. **Sustentação Aerodinâmica: O mecanismo físico**. [s. L.], 2008.

PAULA, Adson Agrico de. **Apostila de Projeto Aerodinâmico**. São Paulo: Universidade de São Paulo - USP, 2012.

PAULA, Adson Agrico de. **Hipersustentadores**. São José dos Campos: Instituto Tecnológico de Aeronáutica - ITA, 2017.

PENTEADO, Paulo Cesar M. **Física Conceitos e Aplicações: Noções de Hidrodinâmica para o Ensino médio**. [s. L.]: Ufrb, [20--?].

PILATI, Gustavo. **A Influência da Automação na Consciência Situacional dos Pilotos**. 2012. 70 f. TCC (Graduação) - Curso de Ciências Aeronáuticas, Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2012.

RODRIGUES, Luiz Eduardo Miranda J. Fundamentos de Aerodinâmica. In: RODRIGUES, Luiz Eduardo Miranda J. **Fundamentos da Engenharia Aeronáutica: Aplicações ao Projeto SAE-AeroDesign**. São Paulo: Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo, 2009. Cap. 2. p. 15-112.

SAINTIVE, Newton Soler. **Performance de aviões a jato: Peso e Balanceamento**. 11. ed. São Paulo: Asa, 2013.

SCHLICHTING, Hermann. **Boundary-Layer Theory**. 7. ed. [s. L.]: Mcgraw-hill Book Company, 1979.

SHIGUEMATU, Camila Akemi Nakamura. **Fazendo conexões com o mundo real: Uso de conceitos e modelos da física no contexto da zoologia**. 2011. 103 f. TCC (Graduação) - Curso de Física, Universidade Estadual Paulista - Unesp, Rio Claro, 2011.

SILVA, Carlos Ari César Germano da. **O Rastro da Bruxa: História da Aviação Comercial Brasileira no Século XX através de seus acidentes: 1928-1996**. 2. ed. Porto Alegre: Edipucrs, 2008.

SILVA, Guilherme Lenon da. **Navegação Aeroespacial: Uma Sequência Didática Diferenciada para o Ensino de Física**. 2016. 54 f. TCC (Graduação) - Curso de Física, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2016.

SILVA, Ramón Eduardo Pereira. **Teoria de Voo**. Taubaté: Universidade de Taubaté, 2013.

STUDART, Nelson; DAHMEN, Sílvio R. A física do voo na sala de aula. In: STUDART, Nelson (Ed.). **A Física na Escola**. 7. ed. São Paulo: Sociedade Brasileira de Física, 2006. p. 36-42. (2).

TORRES, Rodrigo Marin; CATALANO, Fernando Martini. **Projeto e experimento de dispositivos hipersustentadores operantes em baixos Reynolds**. 2016. 7 p. USP, São Carlos.

U.S. Federal Aviation Administration - FAA. **Pilot's Handbook of Aeronautical Knowledge**. Oklahoma City: United States Department of Transportation, 2016. Imprensa Editora Asa.

U.S. National Aeronautics and Space Administration - NASA. **Exploratory Study of the Effects of Wing-Leading-Edge Modifications on the Stall/Spin Behavior of a Light General Aviation Airplane**. Hampton: Scientific and Technical Information Branch, 1979.

U.S. Department of Transportation. **Transportation Statistics Annual Report 2018**. Washington DC: Bureau of Transportation Statistics, 2018.

VILAS-BOAS, Sergio. **O que é voar?** 2011. Disponível em: https://aeromagazine.uol.com.br/artigo/o-que-e-voar_155.html. Acesso em: 22 ago. 2019.

WELTNER, Klaus. **Physics of Flight**. Frankfurt: Goethe-universität, 2015. 8 p.

WELTNER, Klaus. Aerodynamic Lifting Force. **The Physics Teacher**, Nova Iorque, EUA, v. 28, n. 2, p.78-82, 1990.

WHISKY ROMEO ZULU. Direção de Enrique Piñeyro. Produção de Enrique Piñeyro; Verónica Cura. Roteiro: Emiliano Torres; Enrique Piñeyro. Buenos Aires: Aqua Films, 2004. (105 min.), son., color.