

ALEXANDRE FARO KAPERAVICZUS
EDUARDO PENA PESSINI

DESCOMPLICANDO A
**TEORIA DE VOO DE
BAIXA VELOCIDADE**

PILOTO PRIVADO AVIÃO

1ª Edição



São Paulo
Editora Espaço Aéreo
Setembro, 2023

© Copyright de Alexandre Faro Kaperaviczus e Eduardo Pena Pessini

Capa e Diagramação: Editora Espaço Aéreo

Editoração Eletrônica: Grupo Bonilaure

Ilustrações: Aroldo Soares da Costa Filho, Editora Espaço Aéreo e Eduardo Pena Pessini

Revisão Gramatical: Agnaldo Alves

Kaperaviczus, Alexandre Faro

Descomplicando a teoria de voo de baixa velocidade: piloto privado
avião / Alexandre Faro Kaperaviczus, Eduardo Pena Pessini. -- 1. ed. --
São Paulo: Editora Espaço Aéreo, 2023.

ISBN 978-65-993890-2-3

1. Aviação civil. 2. Aerodinâmica I. Pessini, Eduardo Pena. II. Título.

21-77694

CDU 347.7

Índice para catálogo sistemático:

1. Aviação civil: Transportes aéreos 387.7

Aline Grazielle Benitez - Bibliotecária - CRB-1/3129

Distribuição e Comercialização:

Editora Espaço Aéreo

☐ www.espacoaereo.com.br

✉ atendimento@espacoaereo.com.br

f www.facebook.com.br/eaereo

@ www.instagram.com/espacoaereo

www.youtube.com.br/espacoaereo

PREFÁCIO

O livro que está em suas mãos, caro interessado em aviação, aborda temas importantes para o continuado desenvolvimento do voo, motivo de preocupação de projetistas, fabricantes, operadores, autoridades certificadoras, enfim, de todos os envolvidos na operação aeronáutica. Asseguro que os temas tratados pelos autores são fascinantes e muito atraentes, embora inicialmente possam parecer complicados.

O voo moderno requer dos usuários do transporte aéreo uma flexibilidade não possível como a dos pássaros, que fazem verdadeiras acrobacias com a maior facilidade graças à capacidade de mudar sua geometria natural. Decolam e pousam verticalmente sem a necessidade de uma pista. Os aviões, por sua vez, com geometria fixa, precisam de uma infraestrutura específica para operar, os aeroportos, em geral distantes entre si, permitindo interligar duas localidades.

Na cabeça das pessoas a diferença entre o avião e o automóvel que está na sua garagem, dado o grande acesso que se franqueou ao transporte aéreo, é que este último está sempre pronto para sair de casa. Tal fato leva os inovadores a pensarem nos automóveis voadores. Há muitas propostas de soluções, mas até agora não há nos horizontes mundiais uma alternativa que se mostre 100% viável. Assim, caros leitores, os problemas da mobilidade humana esperam por soluções possíveis, sob todos aspectos imagináveis. Não tenho dúvidas, entretanto, que a incrível inventividade humana irá encontrar um caminho.

Se tentarmos escrever a história humana das inovações o resultado seria um livro de milhares ou mesmo de milhões de páginas. Descobriremos ainda o grande papel executado pelas Universidades e pelos seus Alunos e Professores. Você, leitor, é um deles e os autores deste livro esperam, pelo texto que escreveram, sua reação sobre os problemas que afetam a humanidade e a sua habilidade de lidar com suas soluções.

Tudo o que nos cerca e que usamos no dia a dia foi criado pelos inovadores e o processo de criação está numa dinâmica que não terminará jamais. As oportunidades estão à sua disposição. Coloque sua participação nesse elenco de problemas e seja feliz.

Ozires Silva

Ozires Silva é oficial da Aeronáutica e engenheiro formado pelo Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA). Presidente do Conselho de Inovação do Grupo Ânima e reitor do Centro Universitário São Judas Tadeu - Campus Unimonte. Liderou a equipe que projetou e construiu o avião Bandeirante. Liderou em 1970 o grupo que promoveu a criação da Embraer, uma das maiores empresas aeroespaciais do mundo. Deu início à produção industrial de aviões no Brasil. Foi presidente da Petrobras, onde atuou até 1989. Em 1990, assumiu o Ministério da Infraestrutura e, em 1991, retornou à Embraer.

INTRODUÇÃO

Para se tornar piloto de avião, é fundamental adquirir conhecimentos básicos sobre a aerodinâmica e as reações que ela causa na aeronave durante o voo. Dessa forma, o(a) piloto será capaz de iniciar as suas horas de voo com o conhecimento necessário que o(a) capacite a operar as aeronaves de forma segura.

Para isso, o presente livro possui o foco na instrução teórica dos(das) pilotos iniciantes, mas também no aperfeiçoamento e aprofundamento teórico dos(das) pilotos já formados e em operação, no que se refere à aerodinâmica das aeronaves e a teoria e operação dos aviões, principalmente os de pequeno porte.

Os capítulos foram estruturados de forma a levar o(a) leitor(a) a um encadeamento lógico do funcionamento da aerodinâmica associado à estrutura da aeronave, a fim de facilitar a aprendizagem e a localização de determinados tópicos.

Vale ressaltar que todo o conteúdo presente no livro se encontra de acordo com o item 7.10.1 (Curso teórico de Piloto Privado de Avião), da Instrução Suplementar nº 141-007 Revisão A, que foi aprovada pela Portaria nº 1.529/SPO, de 12 de junho de 2020, onde apresenta referências para o curso de piloto privado de avião, a fim de ser compatível com os exames teóricos e com o Anexo 1 da Convenção de Chicago. Além disso, o livro também segue o antigo MCA 58-3/2004, que foi revogado pela mesma portaria.

Então, o objetivo principal da obra é oferecer informações atualizadas, concretas e adequadamente aprofundadas, além de alguns assuntos novos, para o(a) piloto que busca aperfeiçoamento teórico e prático nas operações, inclusive possibilitando um incremento na segurança da operação aérea.

Nós desejamos a você um excelente estudo e excelentes voos!

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO	4
I - CONCEITOS BÁSICOS	12
1 - CONCEITOS FUNDAMENTAIS.....	13
1.1 - Proporcionalidade.....	13
1.2 - Comprimento.....	13
1.3 - Velocidade	16
1.4 - Aceleração	18
1.5 - Força Peso	19
1.6 - Vetor	20
1.7 - Velocidade Absoluta e Relativa	21
1.8 - Leis de Newton.....	21
1.9 - Força Centrípeta	23
1.10 - Momento	24
1.11 - Efeito Magnus.....	24
1.12 - Fluido.....	25
1.13 - Atmosfera	25
1.14 - Densidade do Ar	26
1.15 - Massa.....	28
1.16 - Viscosidade do Fluido	28
1.17 - Pressão.....	31
1.18 - Pressão Atmosférica	31
1.19 - Escalas Termométricas	32
1.20 - Lei dos Gases.....	34
RESUMO	36
II - ESTRUTURA DA AERONAVE.....	44
1 - ESTRUTURAS PRINCIPAIS	44
1.1 - Asa	45
1.2 - Empenagem	46
1.3 - Trem de pouso	47
1.4 - Grupo motopropulsor	48
2- SUPERFÍCIES AERODINÂMICAS E AEROFÓLICOS	49
2.1 - Eixos da Aeronave.....	49
3- ATITUDES DA AERONAVE DURANTE O VOO.....	51
3.1 - Ângulo de Atitude	51
3.2 - Ângulo de Inclinação Lateral	51
3.3 - Ângulo de Guinada.....	52
4 - ÂNGULOS DA ASA EM RELAÇÃO AOS EIXOS	52
4.1 - Ângulo de Diedro	52
4.2 - Ângulo de Incidência.....	53
4.3 - Ângulo de Enflechamento	54
5 - DIMENSÕES DE UMA AERONAVE.....	55

RESUMO	56
III - PRINCÍPIOS DA AERODINÂMICA	62
1 - TIPOS DE PRESSÃO	62
1.1- Pressão Estática	62
1.2- Pressão Dinâmica	63
1.3- Pressão Total.....	63
2- ESCOAMENTO DOS FLUIDOS	63
2.1 - Números de Reynolds	63
2.2- Regime de escoamento	64
2.3- Equação de Bernoulli	65
3 - PERFIS AERODINÂMICOS	68
3.1 - Perfil simétrico	69
3.2 - Perfil Assimétrico	69
4 - GERAÇÃO DAS FORÇAS AERODINÂMICAS	69
4.1 - Ângulo de Ataque	69
4.2- Campo de Pressão	71
RESUMO	72
IV - AERODINÂMICA DO VOO.....	76
1 - TRAÇÃO.....	76
2 - FORÇA PESO	79
3 - RESULTANTE AERODINÂMICA	79
4 - FORÇA DE SUSTENTAÇÃO.....	80
4.1 - Coeficiente de Sustentação.....	81
5- FORÇA DE ARRASTO	82
5.1 - Coeficiente de arrasto	83
6 - ESTOL	87
7 - IMPULSOS DE PRESSÃO	88
8 - EFEITO SOLO.....	89
9 - MOMENTO.....	91
9.1 - Centro Aerodinâmico	92
RESUMO	93
V - DISPOSITIVOS HIPERSUSTENTADORES.....	98
1 - FLAPE	98
1.1 - Flape simples.....	99
1.2 - Flape com fenda	100
1.3 - Flape fowler.....	101
1.4 - Flape ventral	102
1.5 - Outros tipos de flapes	102
2 - SLAT E SLOT	105
3 - RETARDADORES DE ESTOL	107

RESUMO	111
VI - ESTABILIDADE	114
1 - ESTABILIDADE ESTÁTICA.....	114
1.1 - Estabilidade Estática Longitudinal	115
1.2 - Estabilidade Estática Lateral	116
1.3 - Estabilidade Estática Vertical ou Direcional	123
2 - ESTABILIDADE DINÂMICA.....	126
2.1 - Estabilidade Dinâmica Longitudinal	126
2.2 - Estabilidade Dinâmica Lateral	127
2.3 - Estabilidade Dinâmica Vertical ou Direcional	127
RESUMO	128
VII - MANOBRAS.....	132
1 - DECOLAGEM.....	132
1.1 - Influência do Flape na Decolagem	135
1.2 - Influência do Vento na Decolagem.....	135
1.3 - Melhores Condições para Decolagem.....	136
2 - SUBIDA.....	137
2.1 - Tetos de altitude densidade.....	140
3 - VOO HORIZONTAL	141
4 - DESCIDA	143
4.1 - Voo Planado.....	143
5 - POUSO	148
5.1 - Melhores Condições de Pouso	148
5.2 - Pouso de Pista.....	148
5.3 - Pouso de Três Pontos.....	150
5.4 - Pouso com Vento Lateral.....	151
5.5 - Pouso sem Freio	152
5.6 - Hidroplanagem Dinâmica.....	152
6 - ESTOL	153
6.1 - Parafuso	154
6.2 - Parafuso chato	155
7 - FATOR DE CARGA.....	156
7.1 - Estol de Velocidade	159
8 - CURVAS	161
8.1 - Curva Coordenada.....	163
8.2 - Aumento da Velocidade de Estol na Curva	165
8.3 - Raio Limite.....	166
8.4 - Curva Derrapada e Curva Glissada	167
9 - DIAGRAMA V-N (VELOCIDADE – FATOR DE CARGA)	168
RESUMO	169
VIII - GRUPO MOTOPROPULSOR	176
1 - DEFINIÇÕES DE POTÊNCIA	176

2 - PRINCÍPIOS DA HÉLICE	178
3 - ÂNGULO DE PASSO	179
3.1 - Passo Efetivo	180
4 - TORQUE	180
5 - EFEITO ESTEIRA	182
6 - CARGA ASSIMÉTRICA OU FATOR P (PROPELLER – HÉLICE)	182
7 - EFEITO DE PRECESSÃO GIROSCÓPICA	183
8 - TIPOS DE HÉLICES	185
8.1 - Hélice de Passo Fixo	185
8.2 - Hélice de Passo Ajustável.....	186
8.3 - Hélice de Passo Controlável.....	187
9 - EFICIÊNCIA OU RENDIMENTO DA HÉLICE	187
RESUMO	188
IX - CONTROLES DE VOO	192
1 - MOVIMENTOS E EIXOS.....	192
2 - CONTROLES PRIMÁRIOS	193
2.1 - Aileron	194
2.2 - Profundor.....	196
2.3 - Leme de Direção	198
3 - CONTROLES SECUNDÁRIOS.....	199
3.1 - Compensador Fixo	199
3.2 - Compensador Comandável.....	199
3.3 - Compensador Automático	200
4 - SUPERFÍCIE COMPENSADA.....	201
4.1 - Superfície Saliente.....	201
4.2 - Eixo Deslocado.....	202
5 - GUINADA ADVERSA	203
6 - AILERON DIFERENCIAL	204
7 - AILERON TIPO FRISE	204
8 - AIRELON ACLOPADO AO LEME	205
RESUMO	205
X - INSTRUMENTOS	210
1 - SISTEMA PITOT ESTÁTICO	210
2 - VELOCÍMETRO	213
2.1 - Medições de Velocidade	214
2.2 - Sistema de Proteção de Estol.....	215
2.3 - Entupimento do Sistema “Pitot” Estático.....	216
3 - ALTÍMETRO	218
3.1 - Tipos de Altitude	219
4 - VARIÔMETRO.....	222

5 - TACÔMETRO	222
6 - INDICADOR DE CURVAS.....	223
7 - HORIZONTE ARTIFICIAL	225
8 - BÚSSOLA.....	225
RESUMO	227
XI - PESOS DA AERONAVE	232
1 - DEFINIÇÕES BÁSICAS.....	232
1.1 - Tripulação (CREW).....	232
1.2 - Copas (PANTRY).....	232
1.3 - Carga Paga (PAYLOAD).....	233
2 - PESOS OPERACIONAIS	233
2.1 - Peso Básico.....	233
2.2 - Peso Básico Operacional – PBO	233
2.3 - Peso Operacional – PO	234
2.4 - Peso Zero Combustível - PZC.....	234
2.5 - Peso de Decolagem – PD	234
2.6 - Peso de Pouso	234
3 - ABASTECIMENTO DE COMBUSTÍVEL	235
3.1 - Combustível Total	235
3.2 - Combustível Reserva.....	235
3.3 - Combustível para Táxi	235
3.4 - Combustível para Decolagem	235
3.5 - Combustível a Consumir na Viagem.....	235
4 - PESOS MÁXIMOS	236
4.1 - Peso Máximo Estrutural de Decolagem (PMED)	236
4.2 - Peso Máximo de Decolagem (PMD)	236
4.3 - Peso Máximo Estrutural de Pouso (PMEP)	236
4.4 - Peso Máximo de Pouso (PMP)	237
4.5 - Peso Máximo de Táxi (PMT)	237
4.6 - Peso Máximo Zero Combustível (PMPZ).....	237
RESUMO	238
XII - BALANCEAMENTO	242
1 - POSICIONAMENTO DO CG LONGITUDINAL	242
1.1 - CG Posicionado à Frente.....	244
1.2 - CG Posicionado Atrás	245
2 - CÁLCULO DO BALANCEAMENTO.....	246
2.1 - Cálculo e Preenchimento do Peso e Balanceamento (Exemplo).....	246
3 - POSICIONAMENTO DO CG LATERAL	257
RESUMO	259
XIII - INTRODUÇÃO À TEORIA DE ALTA VELOCIDADE	264
1 - COMPRESSIBILIDADE.....	264

2 - VELOCIDADE DO SOM.....	265
3 - MACH.....	266
3.1 - Cone de Mach.....	267
4 - ESCOAMENTO COMPRESSÍVEL.....	268
5 - MACH CRÍTICO.....	269
6 - ENFLECHAMENTO	270
7 - MACH DE DIVERGÊNCIA DE ARRASTO	270
8 - REGIMES DE ESCOAMENTO	271
9 - TIPOS DE ONDAS DE CHOQUE	273
10 - ENFLECHAMENTO	274
10.1 - Fluxo Transversal Fora da Camada-Limite.....	274
10.2 - Wing Fence.....	274
11 - GERADOR DE VÓRTICE	275
12 - AEROELASTICIDADE	276
13 - FENÔMENOS DA ALTA VELOCIDADE	277
13.1 - Pitch Up.....	278
13.2 - Dutch Roll e Roll Off	279
13.3 - Tuck Under.....	280
RESUMO	281

OBJETIVO GERAL

Revisar os conceitos básicos de matemática e física que se aplicam a mecânica dos fluidos e dinâmica do voo, a fim de preparar-se para iniciar os estudos de teoria de voo.



I - CONCEITOS BÁSICOS

Para iniciar o curso, é necessário lembrar alguns conceitos de matemática e física aprendidos durante a vida acadêmica e que serão necessários para a realização das provas teóricas e para a parte prática do voo.

Serão apresentadas algumas unidades de medida utilizadas no meio aeronáutico, como altitude, distância e velocidade. Além disso, alguns conceitos mais aprofundados da mecânica dos fluidos voltados para o estudo da dinâmica do escoamento do ar, conforme a *figura 1-01*, e as forças que atuam na aeronave durante o voo.

A aerodinâmica é definida como a ciência que faz parte da física e estuda o movimento do ar e a sua interação com os corpos. Ou seja, estuda os efeitos do movimento do ar sobre os corpos. Já a aplicação da aerodinâmica ao projeto e à operação das aeronaves em geral, e aos aviões em particular é chamada Teoria de Voo.



Fig. 1-01: Escoamento do ar após a passagem do avião.

Fonte: Boldmethod

1 - CONCEITOS FUNDAMENTAIS

1.1 - Proporcionalidade

Constata-se que algo possui uma relação de proporcionalidade quando a alteração de um valor irá afetar o resultado total, como se pode observar na *Equação 1-1*.

➔ Diretamente proporcional

É um termo que indica que a variação de uma grandeza varia na mesma proporção que outra grandeza, exemplo:

Distância x Consumo de combustível

Ou seja, quanto maior a distância voada, maior será o consumo de combustível.

$$A = \frac{B}{C}$$

Equação 1-1 - Exemplo de proporcionalidade

➔ Inversamente proporcional

É quando uma grandeza varia no sentido contrário de outra grandeza, exemplo:

Velocidade x Tempo

Dessa forma, quanto maior a velocidade da aeronave, menor será o tempo gasto até chegar ao destino.

1.2 - Comprimento



Fig. 1-02: Régua com medição.

Define-se como a distância medida entre dois pontos e pode ser dada em diversas unidades, como em centímetros (cm), metros (m), pés (ft), polegadas (pol), milhas terrestres (Mi) e/ou milhas náuticas (NM – *Nautical mile*).

A unidade padrão utilizada para a altitude das aeronaves é o ‘**pé**’, em inglês *feet (ft)*, que corresponde a **0,3048 metro** na unidade padrão internacional. Outras unidades utilizadas na aviação também são importantes e devem ser lembradas, como segue na *figura 1-03*.

Unidade de medida	Centímetro	Metro	Quilômetro
1 pé (ft)	30,48	0,3048	-
1 polegada (pol)	2,54	0,0254	-
1 milha terrestre (Mi)	-	1.609	1,609
1 milha náutica (NM)	-	1.852	1,852

Fig. 1-03: Unidades de medida (Apresentando valores usuais).

Usualmente, utiliza-se a unidade metros para indicar o comprimento da pista de pouso e decolagem (*figura 1-04*), a unidade pés para representar altitudes e pontos mais altos nos mapas (*figura 1-05*) e a unidade milha náutica para representar distância entre pontos na terra a serem sobrevoados (*figura 1-06*).

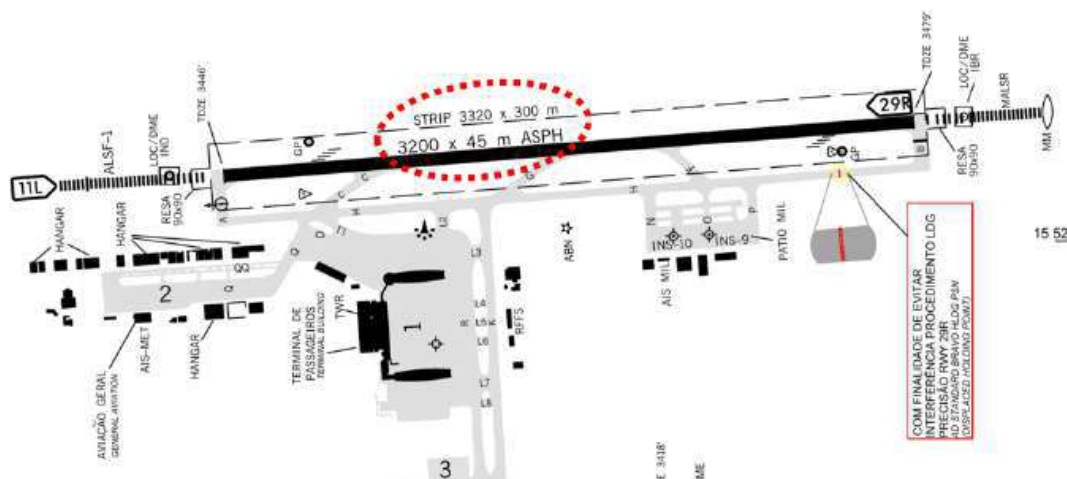


Fig. 1-04: Comprimento da pista em metros.

Fonte: AISWEB; Localidade: SBVT; Tipo: ADC; Carta: ADC SBVT 2A RWY 02; Data: 18/07/2019. Adaptado pelos Autores.

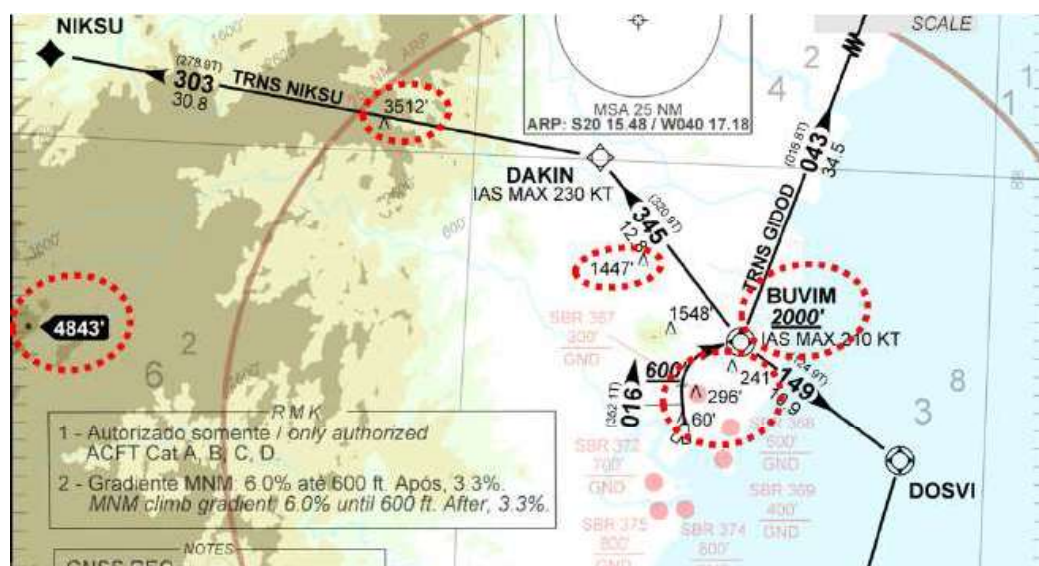


Fig. 1-05: Altitude em pés.

Fonte: AISWEB; Localidade: SBVT; Tipo: SID; Carta: RNAV BUVIM 2A RWY 02; Data: 08/11/2018. Adaptado pelos Autores.

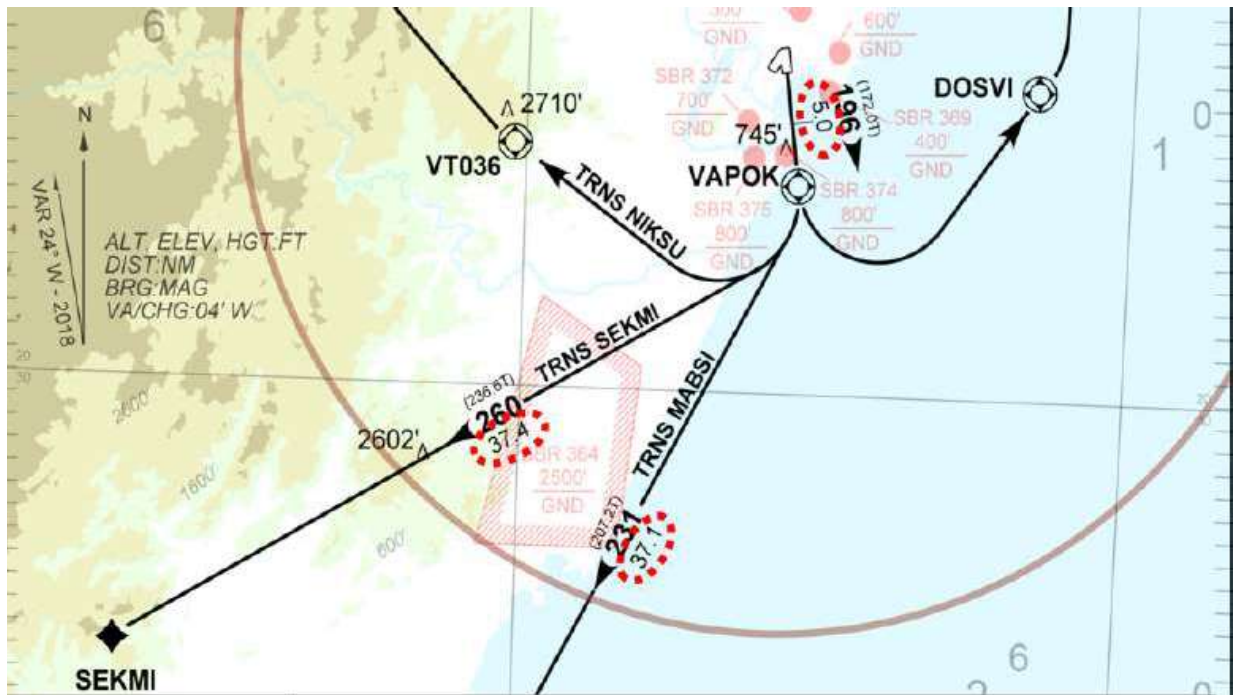


Fig. 1-06: Distância em milhas náuticas

Fonte: AISWEB; Localidade: SBVT; Tipo: SID; Carta: RNAV VAPOK 2A RWY 20; Data: 08/11/2018. Adaptado.

➤ Transformação de unidades

O Sistema Internacional de Unidades (SI) adotou a unidade metro, porém também são utilizados os seus múltiplos, como apresentados na *figura 1-07*.

Ou seja, a unidade km representa 1.000 metros, já a unidade cm representa 0,01 metro. Seguem alguns exemplos:

- 1 km = 1.000 m
- 5 km = 5.000 m
- 1 cm = 0,01 m
- 30,48 cm = 0,3048 m

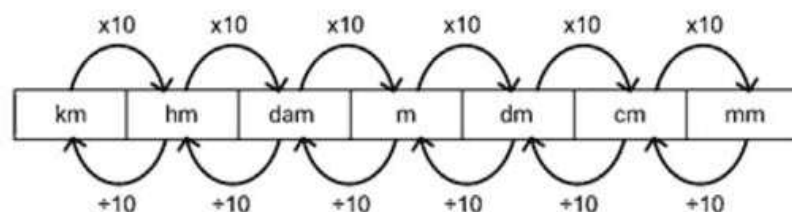


Fig. 1-07: Transformação das unidades de medida.

1.3 - Velocidade

Pode-se medir a velocidade de um corpo que se movimenta em linha reta através da relação entre a **distância percorrida por unidade do tempo**, assim como descrito na *Equação 1-02*. $Velocidade = \Delta Distância / \Delta Tempo$

Equação 1-02 - Velocidade linear

As placas das rodovias, que indicam a velocidade máxima em quilômetros por hora (km/h), são um bom exemplo dessa equação, ou seja, a unidade de medida de distância (km) dividida pela unidade do tempo (hora).

Onde:

Δ **Distância** – Variação da distância linear (metros, quilômetros, pés, milhas...)

Δ **Tempo** – Variação do tempo medido (segundo, minuto ou hora)

→ Velocidade angular

Agora, quando um corpo realiza uma curva, a velocidade de giro poderá ser calculada através da velocidade angular, que representa a velocidade de giro em relação ao centro da curva por unidade de tempo, ou seja, a **variação do ângulo em relação ao tempo**, como mostra a *Equação 1-03*.

Onde:

$$Velocidade Angular = \frac{\Delta \theta}{\Delta Tempo}$$

Equação 1-03 - Velocidade angular

$\Delta \theta$ – Variação do ângulo [radianos¹]

Δ **Tempo** – Variação do tempo [segundos]

Cita-se, como exemplo, o giro da hélice de um motor, em que a velocidade angular é a velocidade de rotação, que pode ser medida a partir da razão entre a variação do ângulo de um ponto fixo da pá e uma unidade de tempo.

Além disso, percebe-se na *figura 1-08* que todos os pontos da hélice estão girando de forma constante, mantendo a velocidade angular constante. Por outro lado, a velocidade linear aumenta quando é aumentada a distância do centro de giro.

¹ A unidade radianos representa uma medida relativa entre o comprimento do arco da circunferência e o valor do seu raio. Sendo que a medida 2π radianos equivale a 360° .

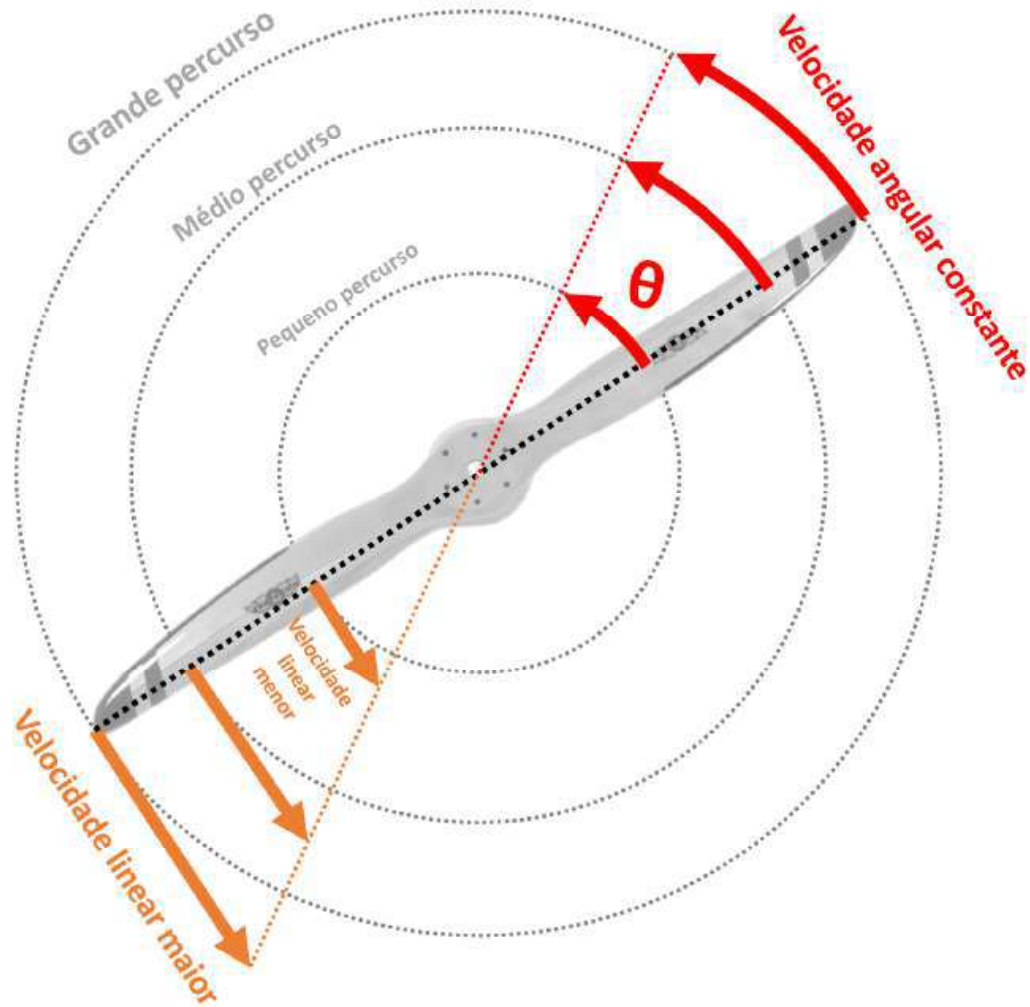


Fig. 1-08: Velocidade angular e linear.

Para entender este fato, vale lembrar uma corrida de atletismo de 400m, em que a largada se dá em pontos diferentes e defasados em distância, como ilustrado na *figura 1-09*, pois quem está na raia mais externa tem que percorrer uma distância maior; por consequência, quanto mais distante do centro da hélice o ponto estiver, maior será a sua velocidade linear.

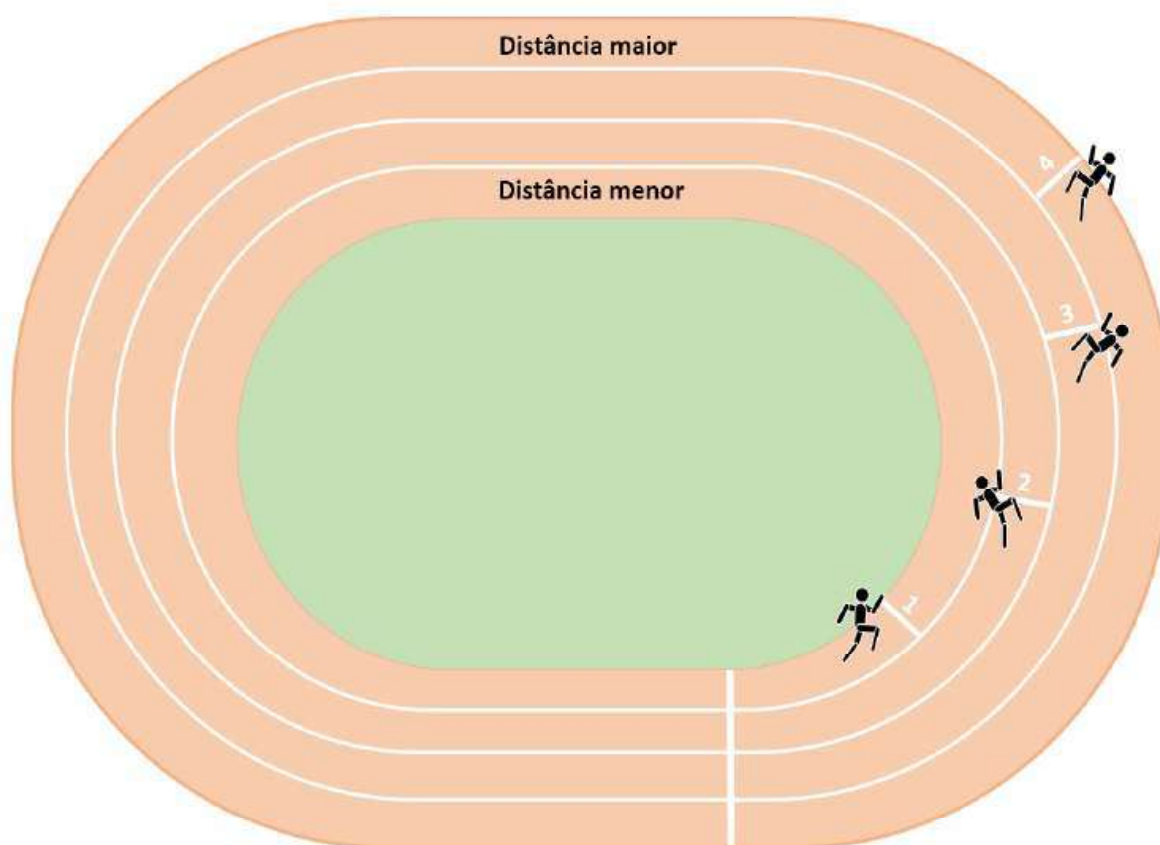


Fig. 1-09: Pista de atletismo.

Em outras palavras, a velocidade angular deve ser constante em todas as partes do corpo rígido que esteja girando, e a velocidade linear aumenta à medida que se afasta do centro.

Esse exemplo pode ser utilizado para qualquer parte que gira na aeronave, como a roda do trem de pouso, que segue o mesmo conceito.

1.4 - Aceleração

Para que seja possível chegar a determinada velocidade, é necessário que o corpo seja exposto a uma aceleração a fim de aumentar ou reduzir a sua velocidade em função da variação do tempo. Portanto, a **aceleração é a razão entre a variação da velocidade e a variação do tempo**, como mostra a *Equação 1-04*.

$$Aceleração = \frac{Velocidade}{Tempo} = \frac{Distância}{Tempo \times Tempo} = \frac{Distância}{Tempo^2}$$

Equação 1-04 -Aceleração

➔ Gravidade

A aceleração gravitacional atua nos corpos que estão no campo gravitacional terrestre, agindo de forma direta na força peso que os corpos possuem e que os “puxam” para o centro do planeta. Por isso, a gravidade é uma aceleração e o peso é uma força.

Ela possui um valor padrão de 9,81 que geralmente é arredondado para 10, para facilitar cálculos. Porém, esse valor é variável, tendo em vista que não depende apenas da massa dos corpos, mas também da distância entre eles. Portanto, em um voo, quanto maior a altitude

da aeronave, menor será a força gravitacional sentida. Por outro lado, quanto mais próximo do Nível Médio do Mar [*Mean Sea Level* (MSL)], maior será a força gravitacional.

$$F = massa \times gravidade = massa \times \frac{Constante}{Distância^2}$$

Equação 1-05 - Força gravitacional

Onde:

F – Força Gravitacional (Peso) [Newton]

m – Massas do corpo [kg]

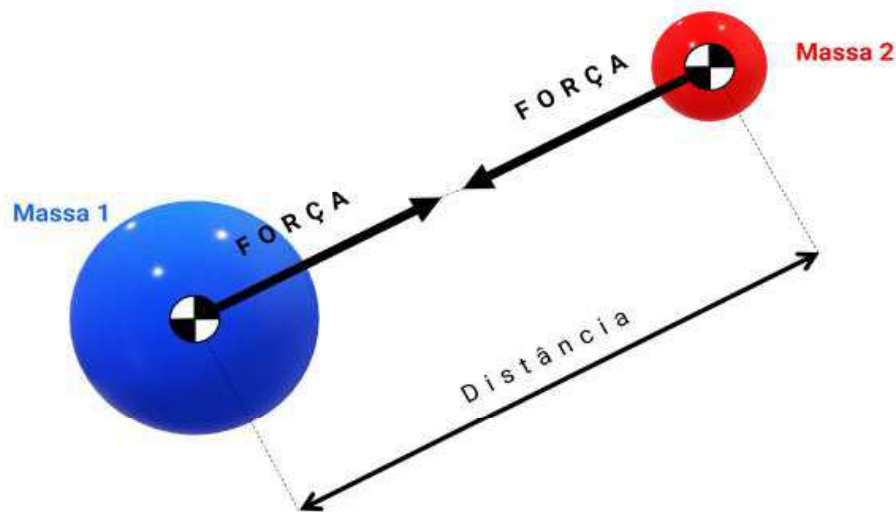


Fig. 1-10: Força da gravidade.

A força provocada pela aceleração da gravidade é chamada de peso e representada através de uma forma vetorial (que são “setas” ou “flechas”) ou simplesmente vetores.

1.5 - Força Peso

O peso é uma força que depende da gravidade local e da massa que o corpo possui. Ou seja, para existir peso, é necessário uma aceleração que esteja atraindo para o centro do Planeta Terra.

Dessa forma, a força peso pode ser mensurada seguindo a *Equação 1-06*, em que a unidade utilizada é $kg \times m/s^2$, ou Newton (N).

$$Peso = Massa \times Gravidade$$

Equação 1-06 - Força peso

Vale ressaltar que a massa do corpo é invariável, desde que não haja acréscimo ou decréscimo de matéria no corpo (Capítulo 1, item 1.15). Já a força peso é variável em função da gravidade local, ou, então, se estiver em uma altitude maior ou menor. Por isso, a

Prof. Faro e Prof. Pessini

aeronave que estiver voando em altitude elevada apresentará uma força peso menor do que se estivesse voando próximo ao MSL.

1.6 - Vetor

Algumas forças, acelerações ou velocidades podem ser representadas por formas vetoriais, onde cada vetor contém três informações, sendo elas: o módulo (intensidade), direção e sentido de aplicação de uma força ou velocidade.

- ❖ **MÓDULO OU INTENSIDADE** – Tamanho ou valor do vetor.
- ❖ **SENTIDO** – Para esquerda, direita, cima ou baixo, ou seja, para onde a seta está apontando.
- ❖ **DIREÇÃO** – Horizontal, vertical ou inclinada.

Exemplo: Uma aeronave está voando a uma velocidade de 150 km/h, na direção horizontal, no sentido da esquerda para a direita, como ilustrado na *figura 1-11*.



Fig. 1-11: Representação vetorial.

✈ Composição e decomposição de vetores

Para auxiliar no entendimento e nos cálculos, pode-se representar o vetor que esteja inclinado através de dois novos vetores nas orientações dos eixos de referência, utilizando-se a decomposição de vetores.

Um exemplo de decomposição pode ser observado na *figura 1-12*, em que o vetor primário representado pelo vetor vermelho foi dividido em dois vetores nas direções de referência (eixo y na vertical e eixo x na horizontal).

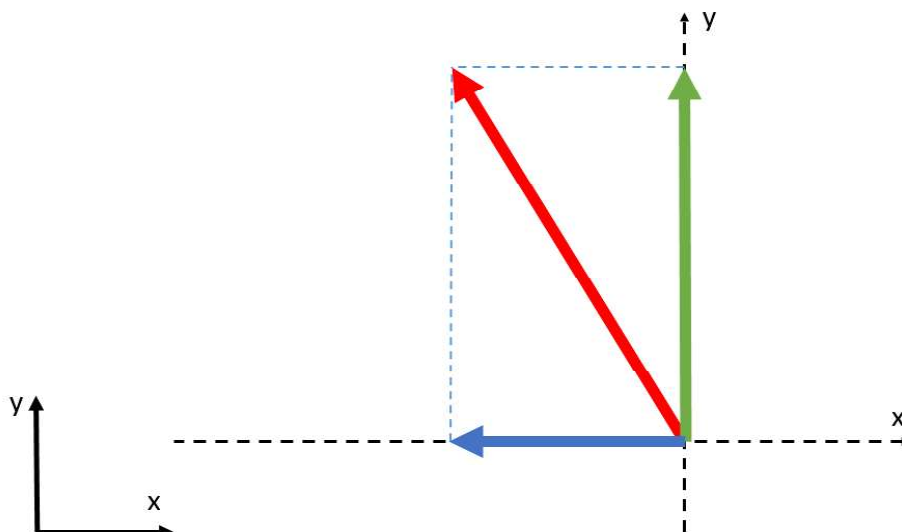


Fig. 1-12: Decomposição de vetores.

Para a decomposição, traça-se uma linha reta que parte da ponta da seta até o eixo de referência, formando um ângulo de 90° com o eixo. Portanto, podemos considerar que os vetores verde e azul são “sombras” do vetor vermelho nos eixos inseridos.

A composição de vetores é no sentido contrário, em que os vetores verde e azul irão gerar o vetor em vermelho resultante.

1.7 - Velocidade Absoluta e Relativa

Os vetores de velocidade podem ser medidos em relação a duas referências: uma estática, que será a Terra, e outra referência em movimento. Dessa forma teremos:

❖ Velocidade absoluta

Velocidade do corpo medido em relação à superfície terrestre. Essa é a velocidade em relação ao solo (V_S) ou *Ground Speed* (GS).

❖ Velocidade relativa

Velocidade medida em relação a um corpo que esteja em movimento, podendo ser maior, igual ou menor do que zero, por depender da soma vetorial entre as velocidades dos corpos.

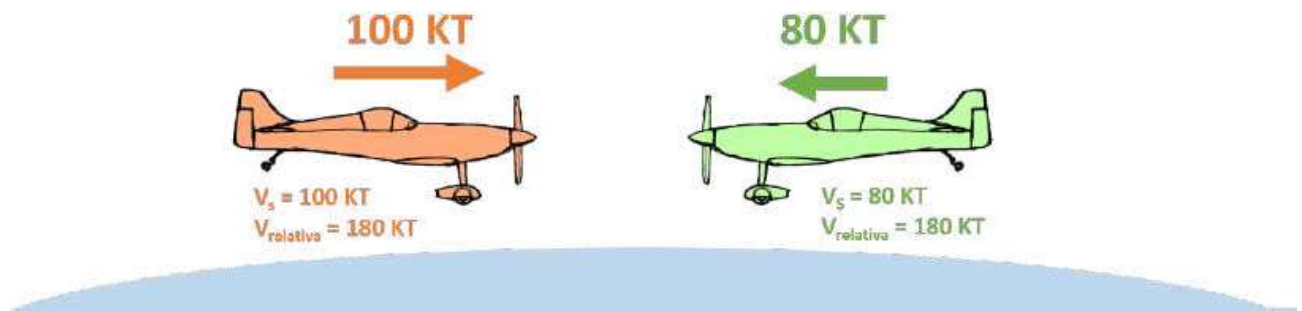


Fig. 1-13: Velocidade relativa e absoluta.

➔ Vento absoluto e relativo

O vento atmosférico é a movimentação da massa de ar na atmosfera e poderá ser medida tendo como referência o solo ou um objeto qualquer em movimento.

❖ Vento absoluto

Velocidade do vento medido em relação à superfície terrestre.

❖ Vento relativo

Velocidade do vento medido em relação a um corpo qualquer.

O somatório de vetores quando se trata de vento absoluto e vento relativo é feito de forma similar à velocidade absoluta e relativa, porém em relação à massa de ar.

1.8 - Leis de Newton

Isaac Newton mudou a história da ciência atual ao publicar a obra *Princípios Matemáticos da Filosofia Natural* (1687), na qual descreve as Leis da Gravitação Universal e as famosas três Leis de Newton, que serão descritas a seguir.

Prof. Faro e Prof. Pessini

→ 1ª lei de Newton

Também chamada de **Lei da Inércia**, descreve a tendência que os corpos possuem em permanecer em repouso ou em Movimento Retilíneo Uniforme (MRU).

Então, um corpo que esteja parado tende a ficar parado, e um corpo que esteja em movimento tende a ficar em movimento, como é ilustrado na *figura 1-14*. Isso é resultado da inércia do corpo, que varia de forma diretamente proporcional à quantidade de massa interna do corpo.

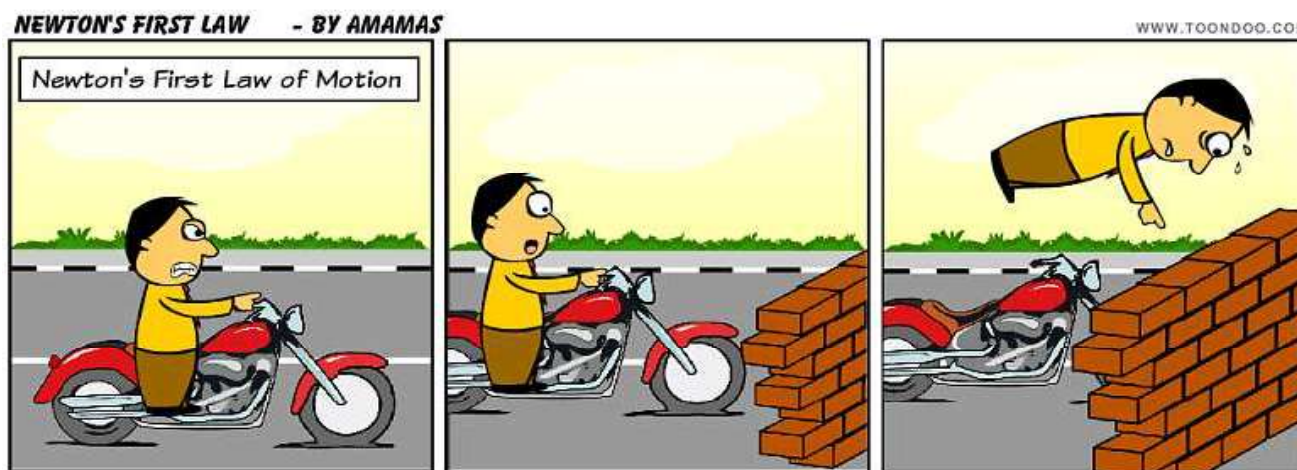


Fig. 1-14: Primeira Lei de Newton.

Fonte: Toondoo.

→ 2ª Lei de Newton

A 2ª Lei de Newton trata do **Princípio Fundamental da Dinâmica**, a qual afirma que, quando se aplica uma mesma força em dois corpos de massas distintas, a aceleração criada será diferente. Dessa forma, teremos a *Equação 1-07*.

$$\text{Força} = \text{Massa} \times \text{Aceleração}$$

Equação 1-07 - Equação da 2ª Lei de Newton

Sabendo disso, ao se aplicar uma força em um corpo que está em movimento, ele apresentará uma aceleração, podendo reduzir ou aumentar a velocidade do corpo.

Portanto, se um corpo possuir uma grande massa, deve-se aplicar uma força razoavelmente grande para acelerá-lo. Agora, se o corpo possuir uma massa reduzida, a força necessária para acelerá-lo será também reduzida, como ilustrado na *figura 1-15*, em que o carrinho com mais caixas precisará de uma força superior para se movimentar.



Fig. 1-15: Aplicação da 2ª Lei de Newton.

→ 3ª Lei de Newton

Chamada de **Lei da Ação e Reação**, afirma que, quando é aplicada uma força em um objeto, esse objeto também responderá com uma força de mesma intensidade, mesma direção e sentido oposto ao aplicado. (*figura 1-16*)



Escaneie para assistir o vídeo ou acesse canal da Editora Espaço Aéreo no Youtube.

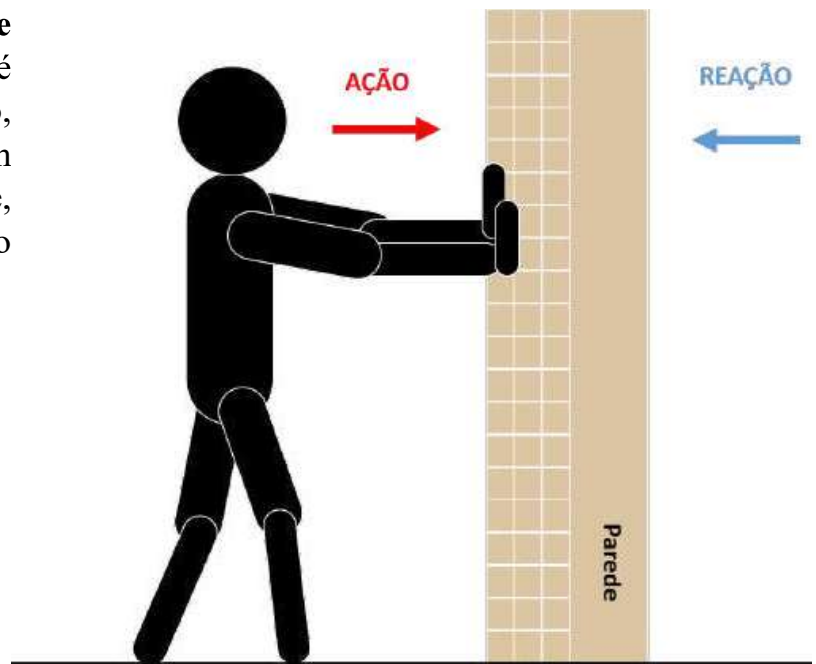


Fig. 1-16: Aplicação da 3ª Lei de Newton.

1.9 - Força Centrípeta

Respeitando a 2ª Lei de Newton, para a realização de uma curva é necessário que seja aplicada uma força ao corpo, voltada para o centro da curva, assim como ilustrado na *figura 1-17*.

Com isso, obtém-se uma força que é proporcional à massa do corpo e à aceleração centrípeta, por estar voltada para o centro da curva.



Fig. 1-17: Força centrípeta.

$$\text{Força centrípeta} = \text{Massa} \times \text{Aceleração centrípeta}$$

Equação 1-08 - Força centrípeta

Onde a aceleração centrípeta é uma relação entre a velocidade do corpo e o raio de giro da curva, como descrito na *Equação 1-09*.

$$\text{Aceleração centrípeta} = \frac{\text{Velocidade linear}^2}{\text{Raio}}$$

Equação 1-09 - Aceleração centrípeta

Isto posto, pode-se observar que a força necessária para realizar uma curva é diretamente proporcional ao quadrado da velocidade linear e à massa do corpo, e inversamente proporcional ao raio de giro.

Prof. Faro e Prof. Pessini

1.10 - Momento

Também chamado de torque ou conjugado, o momento é a capacidade de fazer girar um corpo por meio da aplicação de uma força distante do ponto de giro.

Dessa forma, o torque pode ser equacionado pela multiplicação entre o vetor força e a distância do ponto de rotação, como na *Equação 1-10*.



Fig. 1-18: Momento, torque ou conjugado.

Onde:

M – Momento (N.m)

F – Força (Newton)

d – Comprimento (metros)

$$M = F \times d$$

Equação 1-10 – Torque

1.11 - Efeito Magnus

Ao realizar a decolagem da aeronave, quando o avião retira as rodas do chão, elas continuarão girando devido à inércia. O problema advém do giro do corpo cilíndrico em torno do eixo da roda associado ao escoamento do ar relativo, acarretando uma reação aerodinâmica chamada de Efeito Magnus.

Esse efeito é observado em cilindros que estão girando em torno do seu eixo com um vento relativo sobre ele, sendo que no ponto em que o ar se movimenta no mesmo sentido de giro, a velocidade é maior e a pressão é menor. Já no ponto em que o ar se movimenta no sentido contrário ao giro da roda, a velocidade é menor, e por consequência a pressão é maior, gerando uma sustentação negativa que interfere na decolagem. (*figura 1-19*)



Fig. 1-19: Efeito Magnus.

Por isso é necessário que o piloto, após a decolagem, com a aeronave fora do solo, efetue a frenagem das rodas, para que seja reduzida possíveis vibrações e a leve sustentação negativa das rodas que estejam girando.

1.12 - Fluido

São consideradas as substâncias fluidas os corpos que não têm forma definida.

“Quando trabalhamos com um fluido, temos um sentimento comum que é oposto àquele do trabalho com o sólido: os fluidos tendem a escoar quando interagimos com eles; os sólidos tendem a se deformar ou dobrar. (...). Um fluido é uma substância que se deforma continuamente sob a aplicação de uma tensão de cisalhamento² (tangencial), não importando o quão pequeno seja esse valor. Assim, líquidos e gases (ou vapores) são as formas, ou fases, que os fluidos podem se apresentar.” (FOX, 2012)

Portanto, a água, o combustível, o óleo e o ar que envolve a Terra são considerados fluidos.

Neste curso, serão estudados apenas fluidos newtonianos, chamados dessa forma devido ao respeito às leis de Newton. Fluidos não newtonianos são mais complexos, como, por exemplo, molho de tomate, pasta de dente, entre outros.

1.13 - Atmosfera

O ar atmosférico que envolve o planeta Terra é composto por diversos gases, incluindo o vapor de água (*figura 1-20*). Dentre esses gases, o oxigênio é de fundamental importância para a sobrevivência dos organismos humanos e também para propiciar a queima do combustível nos motores. É também na atmosfera que as aeronaves conseguem gerar as forças aerodinâmicas que produzem a sustentação.

A atmosfera padrão foi definida internacionalmente para que possa ser utilizada na comparação dos desempenhos de uma aeronave, em condições especificadas de pressão e temperatura. Nesse caso, o ar padrão é considerado um gás perfeito e seco, ou seja, sem a presença de vapor de água em sua composição.

NOME QUÍMICO	FÓRMULA QUÍMICA	MASSA MOLECULAR (kg/kmol)	VOLUME FRACIONAL
Nitrogênio	N ₂	28,0134	78,08%
Oxigênio	O ₂	31,9988	20,94%
Argônio	Ar	39,948	0,93%
Dióxido de carbono	CO ₂	44,00995	0,031%
Metano	CH ₄	16,04303	0,0002%
Hidrogênio	H ₂	2,01594	0,00005%
Vapor de água	H ₂ O	Variável	Variável
Ozônio	O ₃	Variável	Variável
Monóxido de carbono	CO	Variável	Variável

Fig. 1-20: Volume fracional da atmosfera real.

² Tensão de cisalhamento é similar à força que um prego sofre ao suportar um quadro em uma parede, sendo ela uma força tangencial ou cortante. Poderá ser visto mais precisamente no Capítulo 1, item 1.16

Prof. Faro e Prof. Pessini

Essa atmosfera padrão é chamada de ATMOSFERA ISA – em inglês, *International Standard Atmosphere* –, que significa Atmosfera Padrão Internacional.

Portanto, pode-se observar na [figura 1-21](#) que o ar atmosférico seco é composto por nitrogênio, oxigênio e outros gases, sendo a proporção maior de nitrogênio.

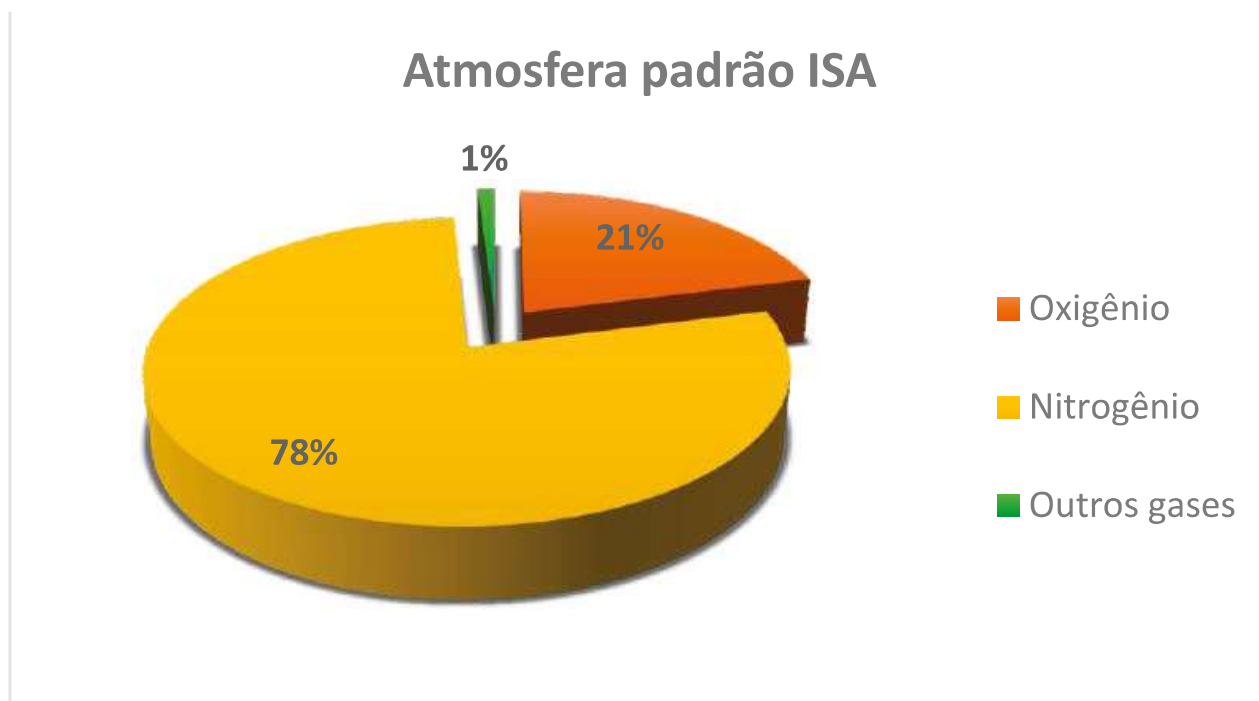


Fig. 1-21: Atmosfera padrão.

Essa proporção de Nitrogênio (78%), Oxigênio (21%) e outros gases (1%) é considerada constante em todas as altitudes, lembrando que o ar fica rarefeito em grandes altitudes, mas a proporção é a mesma no MSL.

Por esse motivo, a densidade do ar atmosférico é reduzida na medida em que se aumentam as altitudes, fazendo com que as aeronaves tenham uma altitude máxima que consigam atingir, denominada Teto Absoluto.

1.14 - Densidade do Ar

Quanto mais elevada for a altitude, menor será a quantidade de ar, ficando este rarefeito. Isso acaba dificultando a respiração ([figura 1-22](#)) e o desempenho das aeronaves.

Isso resulta da maior densidade do ar próximo ao Nível Médio do Mar (MSL – *Mean Sea Level*), como decorrência da ação da gravidade e da maior pressão atmosférica. Quando se atinge grandes altitudes, a densidade do ar fica menor, dificultando a respiração, além de reduzir a potência dos motores, prejudicando assim a geração de sustentação aerodinâmica nas asas dos aviões. Observe na [figura 1-23](#) um esquema que representa uma ilustração da densidade em relação à altitude.

Sabe-se, também, que a densidade de um corpo ou de um fluido pode ser medida pela razão entre a massa interna e o volume ocupado, ou então se pode imaginar que seja o quão próximas as moléculas estão umas das outras em um volume predeterminado.



Fig. 1-22: Máscaras de oxigênio.

Fonte: Seafly.

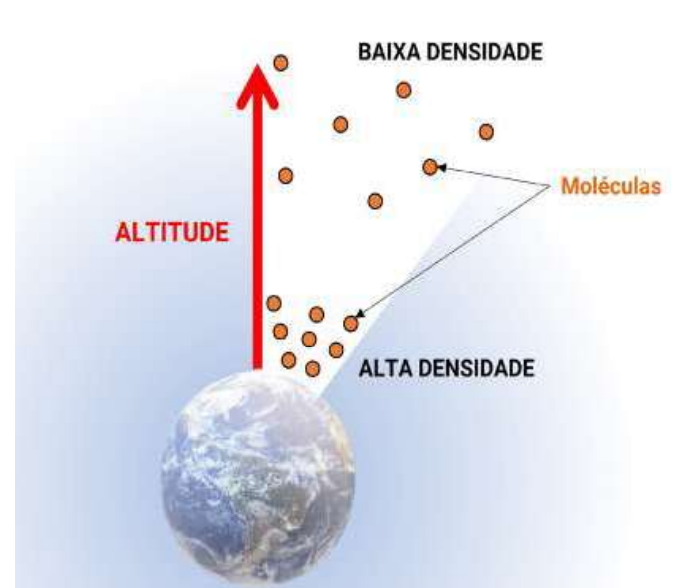


Fig. 1-23: Densidade do ar.

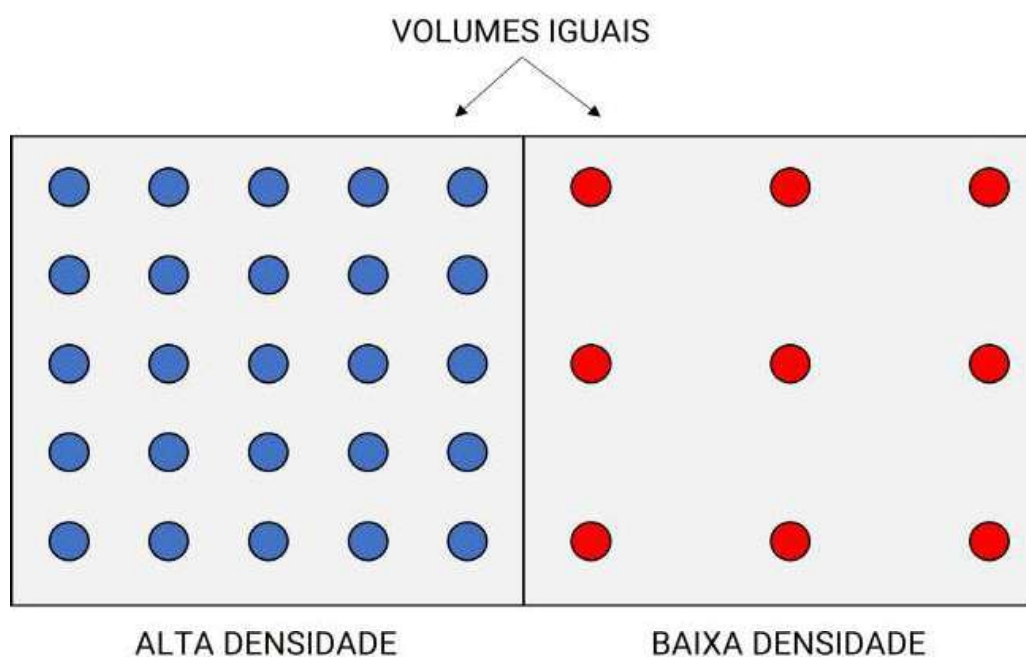


Fig. 1-24: Densidade da substância.

Portanto, a *Equação 1-11* sobre densidade é dada como:

$$Densidade = \frac{Massa}{Volume} \left[\frac{kg}{m^3} \right]$$

Equação 1-11 - Densidade

Prof. Faro e Prof. Pessini

Logo, quando a aeronave estiver voando em uma altitude maior, menor será a “quantidade de ar” que poderá gerar sustentação, como se pode constatar na fórmula da sustentação. Dessa forma, quanto menor a densidade do ar, menor a sustentação da aeronave.

$$L = \frac{1}{2} \rho V_A^2 S C_L$$

Equação 1-12 - Sustentação da aeronave

Onde:

 L – Sustentação ρ – Densidade do ar V_A – Velocidade aerodinâmica (*True Air Speed – TAS*) S – Área da asa C_L – Coeficiente de sustentação

Considera-se que a densidade do ar na atmosfera padrão ISA é a massa de ar em um metro cúbico de volume, no MSL, é de 1,225 quilogramas ou 1.225 gramas.

É importante lembrar, também, que a densidade não é igual à massa do corpo.

1.15 - Massa

A massa é por definição a quantidade de matéria contida em um corpo, podendo ou não ser alterada se for inserida ou retirada matéria desse corpo.

Exemplo: Uma massa de 1 kg de chumbo e uma massa de 1 kg de isopor são colocadas em uma piscina com água. O isopor, mesmo possuindo a mesma massa que o chumbo, irá flutuar e o chumbo irá afundar, pois a densidade do chumbo é maior que a água, e a densidade do isopor é menor do que a da água.

A unidade de medida da massa é o grama (g), sendo outra unidade muito utilizada no sistema inglês é a libra (lb). Onde:

$$1 \text{ lb} = 0,454 \text{ kg}$$

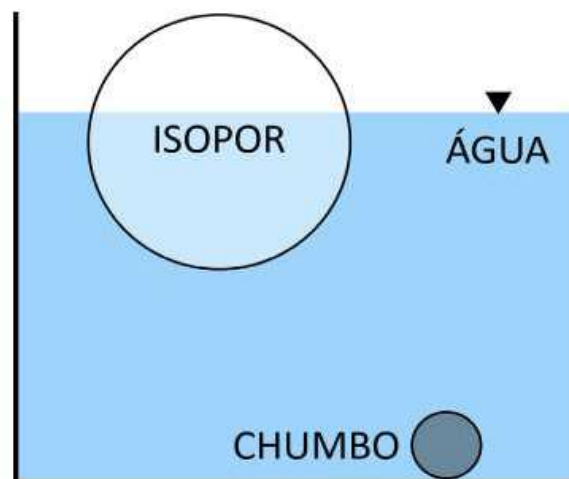


Fig. 1-25: Piscina com isopor e chumbo.

1.16 - Viscosidade do Fluido

Considera-se a viscosidade como uma medida de resistência ao escoamento de um fluido qualquer, sendo ele o ar atmosférico ou o óleo do sistema de arrefecimento do motor.

Popularmente se diz que o óleo é “grosso” por escorrer mais lentamente quando comparado com a água. Isso se deve à viscosidade do fluido, significando dizer que quanto mais tempo demorar para escoar, maior será a sua viscosidade, por apresentar maior resistência interna ao cisalhamento, que representa maior força contrária ao movimento. Pode-se então analisar a *figura 1-26*, que apresenta duas placas/superfícies que estão separadas por um fluido viscoso. Quando se aplica uma força na placa superior, o fluido irá atuar resistindo ao movimento, através de uma tensão de cisalhamento.

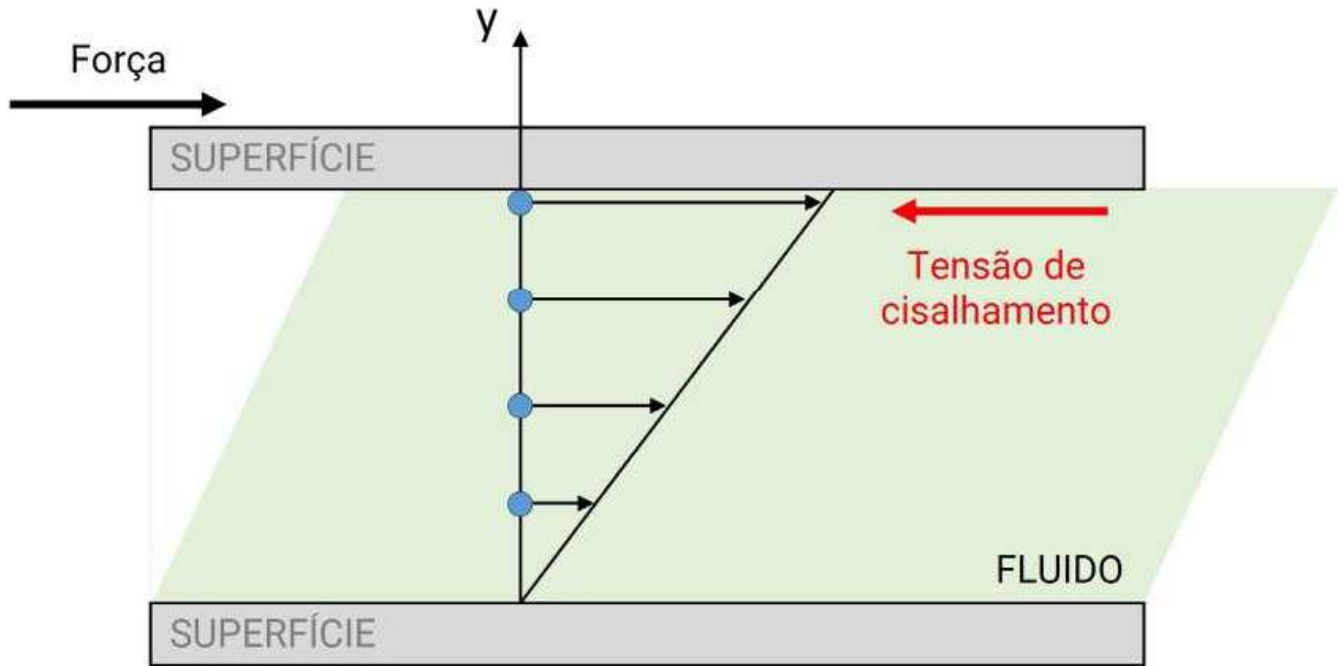


Fig. 1-26: Tensão de cisalhamento.

A tensão de cisalhamento aparece de forma similar quando ocorre um movimento interno das moléculas de um fluido viscoso. Essa tensão é maior quando o fluido possui maior viscosidade.

Vale alertar que viscosidade não é sinônimo de densidade, pois ao comparar um óleo de cozinha com a água, ambos à temperatura ambiente, constata-se que o óleo é mais viscoso e apresenta densidade menor do que a da água. (*figura 1-27*).



Fig. 1-27: Comparação de viscosidade entre água e óleo.

Ademais, a viscosidade do fluido é alterada pela temperatura. Por exemplo, em uma aeronave o óleo do motor frio é mais viscoso do que o óleo do motor quente, por isso deve-se aguardar o motor aquecer antes de iniciar um voo, permitindo assim que o óleo seja capaz de percorrer de forma correta todo o sistema.

Temperatura menor → Viscosidade maior

Temperatura maior → Viscosidade menor

→ Camada-limite

O conceito da camada-limite vem através do escoamento de um fluido viscoso sob uma superfície, onde as forças viscosas e as forças de inércia são importantes.

Então, a camada-limite é uma região do escoamento onde a velocidade do fluido é menor do que a velocidade do escoamento a certa distância da superfície, como se pode observar nos vetores de velocidade na *figura 1-28*, partindo da velocidade do escoamento nula na superfície e aumentando a velocidade com o distanciamento da superfície. Isso ocorre em qualquer parte da aeronave que esteja sob o escoamento do ar.

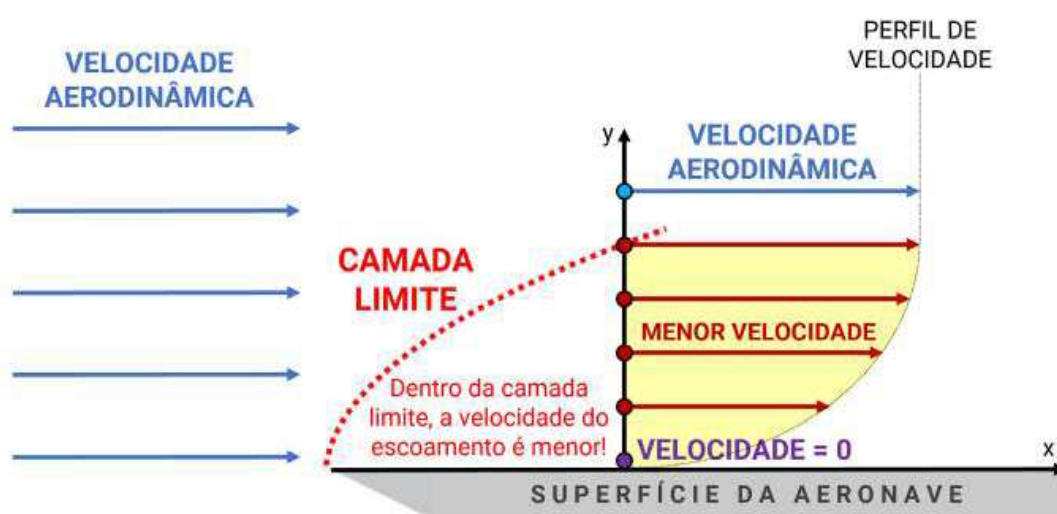


Fig. 1-28: Camada-limite.

Isso pode ser comprovado de forma prática realizando-se um teste simples na lataria de um carro em movimento. Ao colocar a mão próxima à lataria do veículo, é possível sentir uma redução da velocidade do ar em relação a uma posição da mão um pouco mais distante da superfície do carro. (*Figura 1-29*)

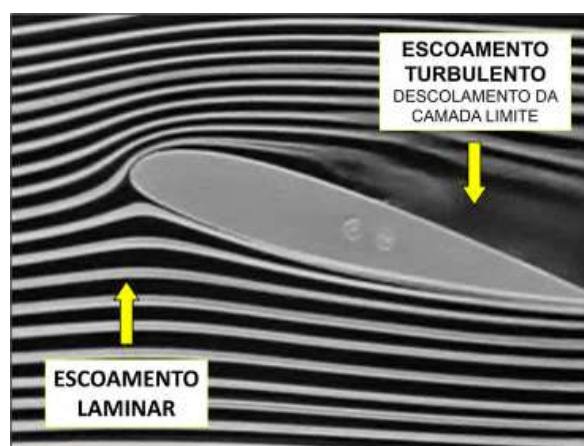


Fig. 1-29: Escoamento laminar e turbulento.

O escoamento dentro dessa camada pode ser laminar ou turbulento, mas quando a camada-limite se desprende da superfície por não conseguir seguir mais o seu formato, ocorre o fenômeno chamado de estol. Para esse caso na aviação, quando ocorre o estol, não é mais possível gerar sustentação suficiente para manter o voo da aeronave, além de aumentar significativamente o arrasto.

1.17 - Pressão

Para estourar um balão é possível utilizar um alfinete, um prego ou até um palito de dente. Mas se, em vez de apenas um, for utilizada uma cama de alfinetes, pregos ou palitos (*figura 1-30*), será que o mesmo balão irá estourar tão facilmente? A resposta é não. Isso se deve à grande área de aplicação da força para estourá-lo, ou seja, a pressão de aplicação foi reduzida. Em outras palavras, o balão estoura devido à pressão elevada aplicada em um único ponto.

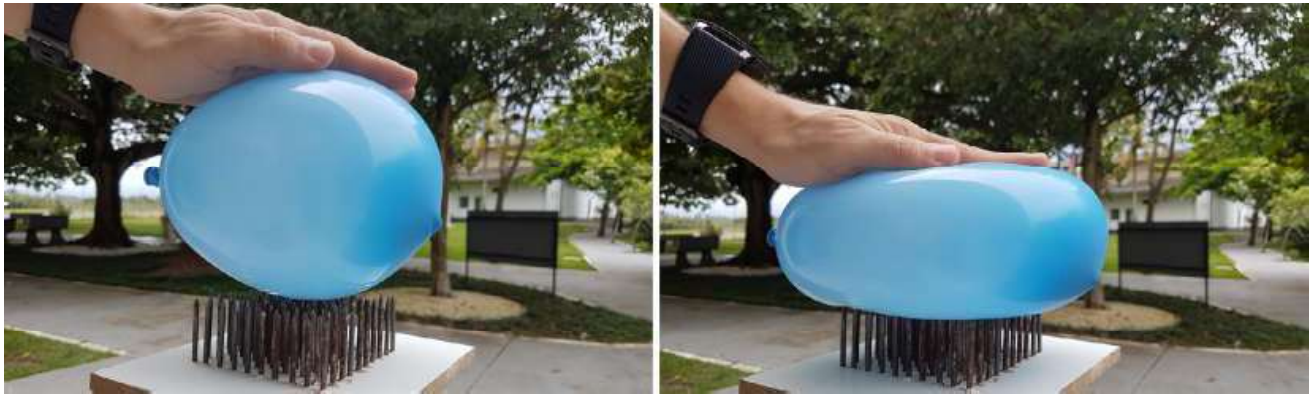


Fig. 1-30: Cama de pregos.

Pode-se dizer que a pressão decorrente de uma força depende da área de aplicação, ou como segue na *Equação 1-13*.

$$\text{Pressão} = \frac{\text{Força}}{\text{Área}}$$

Equação 1-13 - Pressão

A pressão utiliza a unidade Pascal (Pa), que representa a força de um Newton por metro quadrado.

1.18 - Pressão Atmosférica

A camada atmosférica é composta por uma grande massa de ar que se estende até a exosfera em uma altitude que já se confunde com o espaço. Toda essa massa de ar atmosférico, submetida à aceleração da gravidade, provoca a força peso. Agora, considerando-se uma área de aplicação unitária dessa força, tem-se a chamada **pressão atmosférica**. (*figura 1-31*)

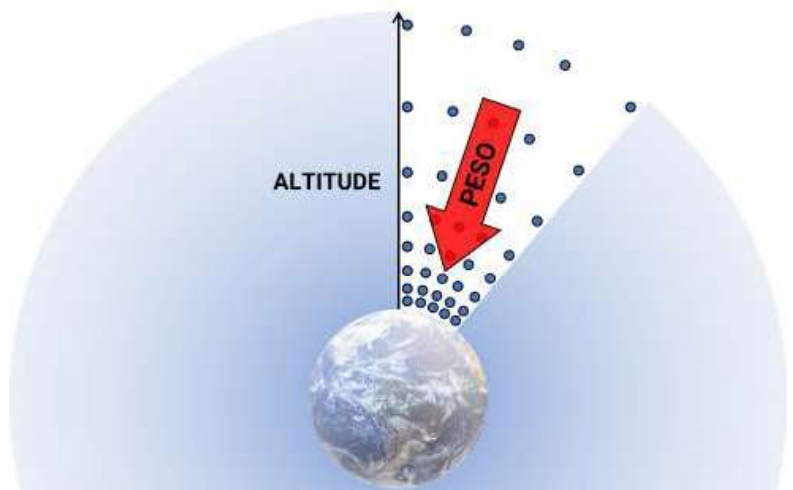


Fig. 1-31: Pressão atmosférica.

Prof. Faro e Prof. Pessini

Pode-se observar essa pressão através da medição por um tubo de mercúrio dotado de régua em polegadas (*figura 1-32*). Esse exemplo foi realizado ao nível médio do mar (MSL) e com as condições da atmosfera padrão ISA.

Preenchendo o tubo com mercúrio e colocando-o em um recipiente da forma representada, o mercúrio irá tentar escorrer todo para o recipiente. Contudo, isso não irá acontecer, pois a pressão provocada pela atmosfera (ponto A) será igual à pressão provocada pela camada de mercúrio dentro do tubo (ponto B), além de formar uma região de vácuo, impedindo que desça mais mercúrio.

Não havendo mais a diferença de pressão, o mercúrio irá permanecer dentro do recipiente, porém marcando na régua externa à altura de 29,92 polegadas.

Isso representa a pressão da atmosfera padrão, onde é necessária uma coluna de 29,92 polegadas de mercúrio para produzir uma pressão equivalente à coluna de ar do ponto A até o fim da exosfera.

Dessa forma, a Pressão Atmosférica Padrão ISA possui valores de referência, e as suas variações devem ser lembradas como segue na *figura 1-33*.

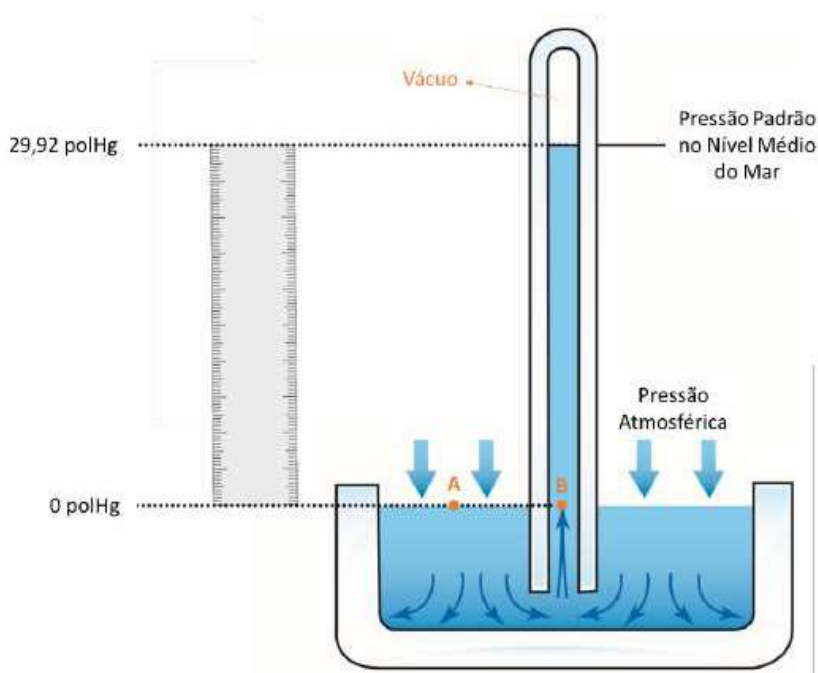


Fig. 1-32: Pressão atmosférica medida.

Fonte: UNITED STATES, 2003

Condições ISA: MSL e a temperatura de 15°C					
Unidade	hPa	kPa	Pa	polHg	mmHg
Pressão	1013,25	101,325	101325	29,92	760

Fig. 1-33: Pressão atmosférica padrão.

1.19 - Escalas Termométricas

A temperatura medida de uma substância ou material representa o grau de agitação em que as moléculas estão naquele momento. Esse grau de agitação pode ser mensurado através das escalas termométricas que são utilizadas na aviação e nos cálculos.

As escalas apresentadas na *figura 1-34* indicam a temperatura de congelamento da água em três escalas, sendo a escala Kelvin chamada de escala absoluta, por não apresentar valores negativos (por isso ela é utilizada nos cálculos).

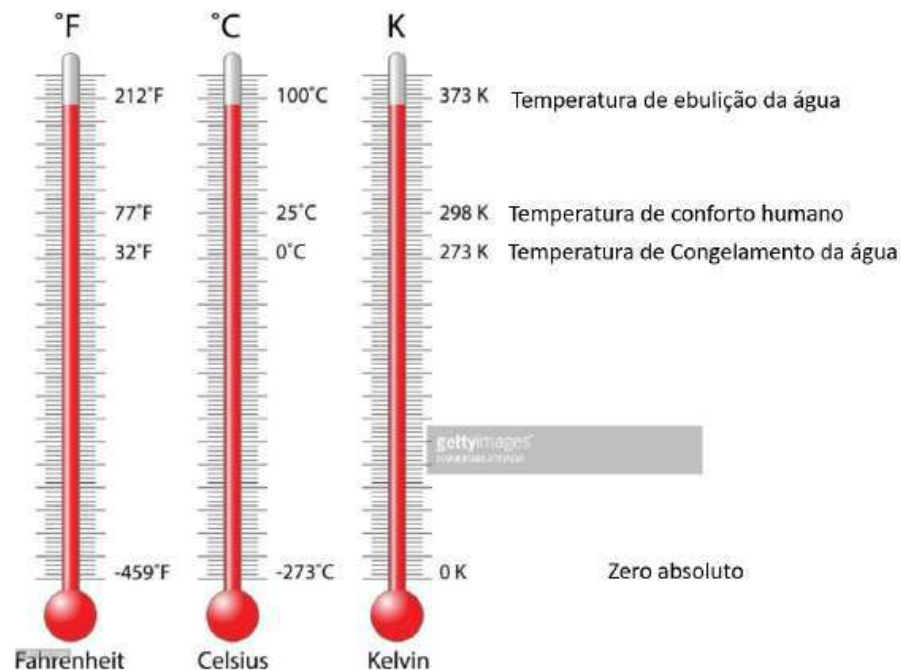


Fig. 1-34: Escalas termométricas.

Com isso, quanto maior a temperatura da substância, maior será a agitação das moléculas dele, possuindo maior energia. Agora, se a temperatura do gás for menor, a agitação será menor, possuindo menor energia.

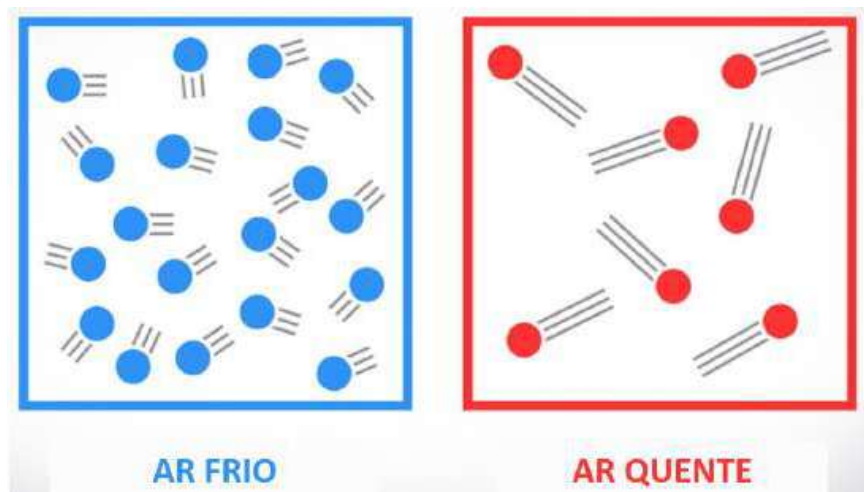


Fig. 1-35: Agitação molecular com temperatura.

Fonte: BOLDMETHOD

Além disso, a temperatura afeta a densidade do ar através da alteração da agitação molecular, interferindo na proximidade das moléculas. Com isso, quanto maior a temperatura, maior a energia e menor a densidade do ar. Por outro lado, quanto menor a temperatura, maior a densidade do ar devido à redução da energia e aproximação das moléculas.

1.20 - Lei dos Gases

As leis dos gases descrevem as alterações que ocorrem nos gases ideais, descritas por Boyle-Mariote, Gay-Lussac e Charles, considerando um cilindro com gás interno armazenado.

Essas leis respeitam a equação dos gases ideais, como mostrado na *Equação 1-14*.

$$pV = \frac{m}{M}RT$$

Equação 1-14 - Equação de Clapeyron

Onde:

p – Pressão do gás

V – Volume que o gás ocupa

m – Massa do gás

M – Massa molar do gás

R – Constante molar

T – Temperatura

→ Lei de Boyle-Mariotte

Lei que descreve os processos isotérmicos (temperatura constante), conforme a *Equação 1-15*.

$$p = \frac{\text{constante}}{V}$$

Equação 1-15 – Equação da lei de Boyle-Mariotte

Então, se em um cilindro dotado de um pistão móvel duplicar a pressão, o volume será reduzido à metade, forçando as moléculas do ar a ficarem mais próximas, aumentando assim a densidade.

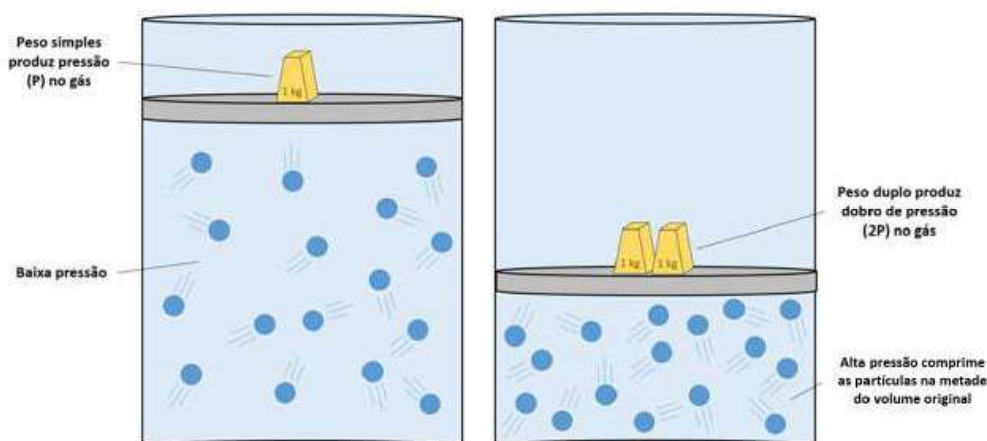


Fig. 1-37: Lei de Boyle-Mariotte.

Com isso, o aumento da pressão causará uma redução no volume, ou seja, serão inversamente proporcionais.

→ Lei de Charles

A lei descreve um processo isobárico (pressão constante), como indica a *Equação 1-16*.

$$V = constante \times T$$

Equação 1-16 – Equação da Lei de Charles

Nesse caso, se em um cilindro dotado de um pistão móvel se duplicar a temperatura interna, o volume será duplicado forçando as moléculas do ar a ficarem mais afastadas, diminuindo assim a densidade.

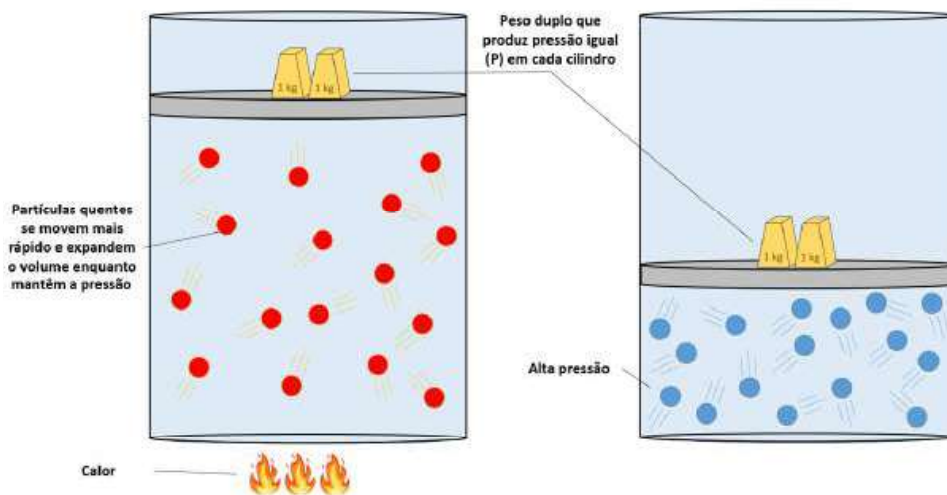


Fig. 1-38: Lei de Charles.

Com essa lei observa-se que, à temperatura constante, o volume do gás é diretamente proporcional à temperatura absoluta (utilizando a escala termométrica absoluta).

Além disso, ao se aumentar a temperatura do ar, a densidade irá diminuir. Então, em um dia frio e seco, o ar terá maior densidade e será mais favorável para o voo do que em um dia quente e úmido.

→ Lei de Gay-Lussac

Essa lei descreve um processo isocórico ou isovolumétrico, ou seja, mantendo o volume constante, como mostra a *Equação 1-17*.

$$P = constante \times T$$

Equação 1-17 – Equação da Lei de Gay-Lussac

Então, se em um cilindro dotado de um pistão móvel se duplicar a temperatura, a pressão deverá duplicar para que o volume permaneça constante.

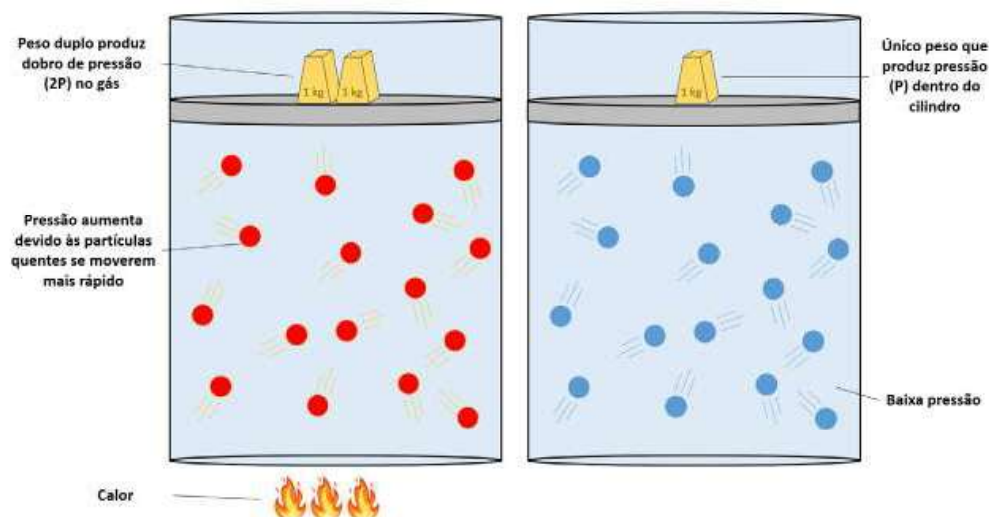


Fig. 1-39: Lei de Gay-Lussac.

Isso indica que, a um volume constante, a pressão do gás é diretamente proporcional à temperatura.

RESUMO

➤ Proporcionalidade

Se um valor é afetado de forma direta ou inversa à variação do outro valor. Por exemplo: $A \times B = C$, onde A e B são diretamente proporcionais a C. Agora, se C for um valor fixo (constante), então A é inversamente proporcional a B.

➤ Comprimentos

Unidades utilizadas na aviação são:

- **Metro (m):** Unidade do Sistema Internacional
- **Pés (ft):** Equivale a 0,3048 metro ou 30,48 centímetros.
- **Polegada (pol ou in):** 0,0254 metro ou 2,54 centímetros.
- **Milhas terrestres (mi):** 1.609 metros.
- **Milhas náuticas (NM):** 1.852 metros.

➤ Velocidade Linear

Medida através da razão (divisão) entre a distância percorrida pelo tempo.

➤ Velocidade Angular

Velocidade de rotação medida através da variação do ângulo em um determinado tempo.

Em um corpo rígido como a hélice, a velocidade angular é constante em toda a pá, mas a velocidade linear aumenta com o aumento do raio de giro (a ponta da hélice é mais veloz do que a raiz da hélice).

✈ Aceleração

Variação da velocidade em relação ao tempo decorrido. A gravidade terrestre é uma aceleração.

✈ Gravidade

Aceleração que depende da distância que o corpo está em relação à Terra. Quanto mais alto o voo estiver sendo realizado, menor a gravidade.

✈ Peso

É uma força que depende da massa contida no corpo e a aceleração da gravidade.

✈ Vetor

Pode ser uma força ou velocidade, que é representada por uma seta que contém três informações:

- Módulo (tamanho ou valor);
- Direção (se está na horizontal, vertical ou inclinado); e
- Sentido (para onde a seta está apontando).

✈ Velocidade absoluta

Velocidade do corpo em relação à Terra.

✈ Velocidade relativa

Velocidade de um corpo em relação a outro, desde que não seja a Terra. Se for relacionado à Terra, recebe o nome de Velocidade Absoluta.

✈ Vento absoluto

Velocidade em que o ar se movimenta em relação à Terra.

✈ Vento relativo

Velocidade em que o ar se movimenta em relação a um corpo qualquer que não seja a Terra.

✈ Leis de Newton

- 1ª Lei: Lei da inércia.
- 2ª Lei: Princípio Fundamental da Dinâmica ($\text{Força} = \text{Massa} \times \text{Aceleração}$).
- 3ª Lei: Lei da Ação e Reação.

✈ Força centrípeta

Força responsável pela curva da aeronave, sendo orientada para o centro da curva.

É diretamente proporcional à velocidade da aeronave e inversamente proporcional ao raio da curva comandada.

Prof. Faro e Prof. Pessini

✈ Momento

- Torque ou conjugado de forças.
- Calculado pela multiplicação entre a força e a distância do ponto de giro.
- O vetor força deve estar perpendicular (90°) ao braço da alavanca no ponto de aplicação.

✈ Efeito Magnus

Quando um corpo esférico (ou cilíndrico) gira em torno do seu próprio eixo e ainda possui um escoamento externo ao corpo, uma força será gerada devido à diferença de pressão. No ponto onde a velocidade linear do giro do corpo vai contra o escoamento (os vetores têm sentidos invertidos), haverá uma maior pressão. Se for no mesmo sentido, a pressão será menor. Isso acontece no pneu da aeronave que não possui polaina de rodas, logo após a decolagem.

✈ Atmosfera

Fluido que envolve o planeta Terra, com sua composição essencialmente constante dentro da chamada homosfera (ou seja, abaixo de 90km de altitude).

- 21% de Oxigênio.
- 78% de Nitrogênio.
- 1% de outros gases, sendo o Argônio (Ar) a grande maioria.

✈ Densidade

- Razão (divisão) entre a massa do corpo pelo volume por ele ocupado.
- Densidade do ar padrão (condições ISA) é de $1,225 \text{ kg/m}^3$.
- Quanto mais alto estiver voando, menor a densidade atmosférica.

✈ Massa

Quantidade de matéria que o corpo possui, sendo invariável desde que não haja acréscimo ou retirada de matéria naquele corpo.

✈ Viscosidade do fluido

- Medida da resistência ao escoamento de um fluido quando se aplica uma tensão cisalhante, ou seja, o quanto ele resiste à movimentação relativa.
- A temperatura é inversamente proporcional à viscosidade de um fluido (maior temperatura resulta em menor viscosidade).

✈ Camada limite

- Região do escoamento que tem interferência do atrito viscoso, ou seja, é a região do escoamento, próxima à superfície, que possuirá uma velocidade de escoamento menor do que a velocidade do fluido não perturbado (antes de o fluido tocar a superfície). O escoamento pode ser tanto laminar quanto turbulento.

✈ Pressão

Força aplicada em uma determinada área.

✈ Pressão atmosférica

Pressão calculada pelo peso exercido pela camada de ar acima do ponto estudado (área).
A pressão atmosférica padrão equivale a:

- 1013,25 hPa;
- 760 mmHg; ou
- 29,92 polHg.

✈ Temperatura

- Grau de agitação molecular.
- Interfere na densidade e viscosidade do fluido.
- Altera a velocidade do som.

✈ Escalas termométricas

As escalas utilizadas são:

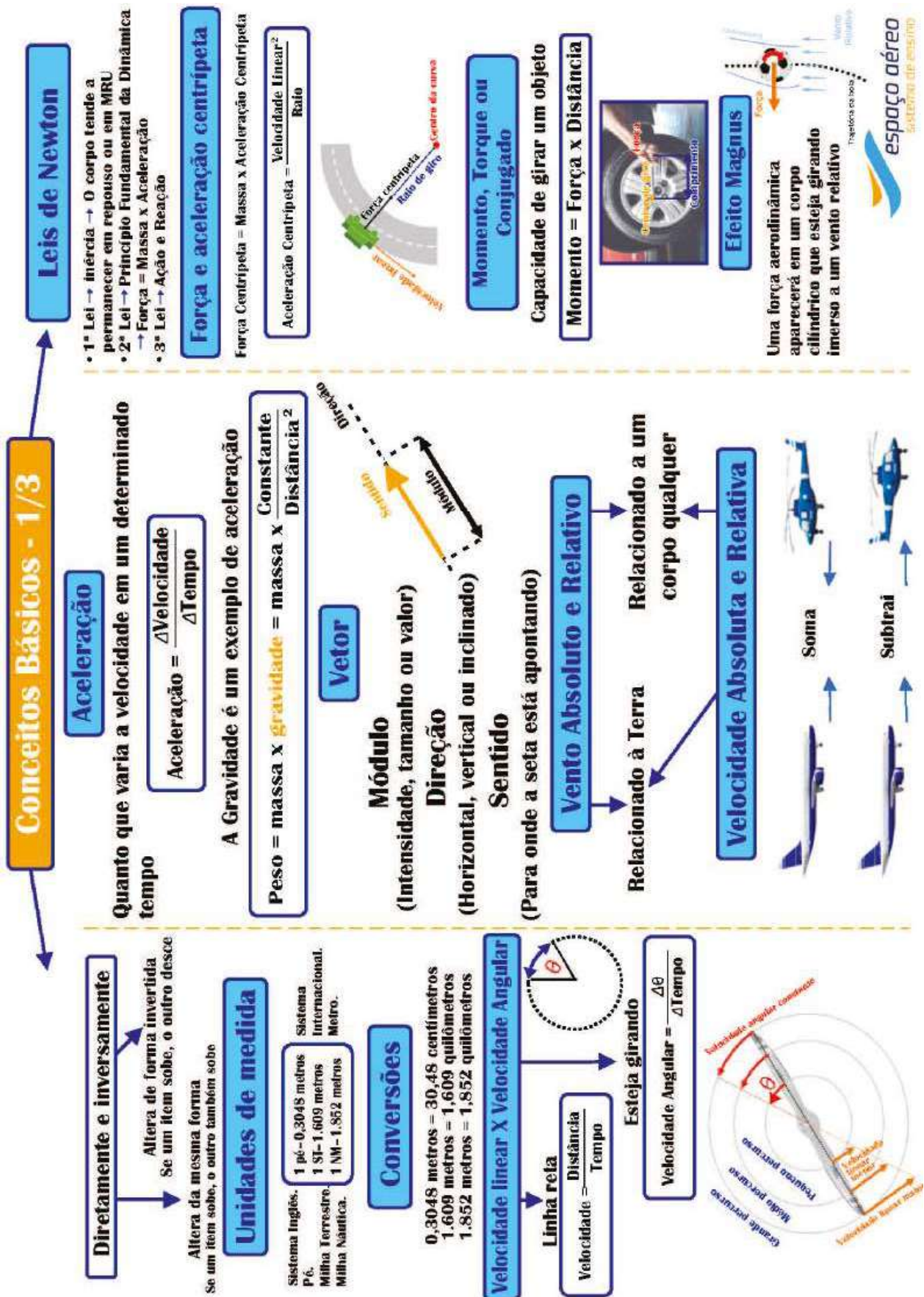
- Celsius – O congelamento da água ocorre a 0°C e a ebulição da água, a 100°C .
- Fahrenheit – O congelamento da água ocorre a 32°F e a ebulição da água, a 212°F .
- Kelvin – Escala absoluta, com o congelamento da água ocorrendo a 273K e a ebulição da água, a 373K .

A escala termométrica absoluta não utiliza o termo ‘grau’.

A transformação de graus Celsius em Kelvin faz-se com a soma de 273 no valor em Celsius. Para o inverso, basta diminuir 273 do valor Kelvin para obter o valor em graus Celsius.

✈ Lei dos Gases

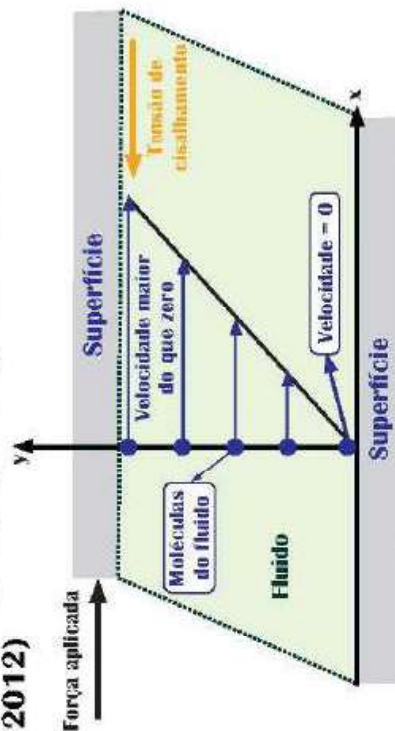
- Lei de Boyle – Mariotte: Processos isotérmicos (temperatura constante). A pressão e o volume são inversamente proporcionais.
- Lei de Charles: Processos isobáricos (pressão constante). O volume e a temperatura são diretamente proporcionais.
- Lei de Gay-Lussac: Processos isocóricos ou isovolumétricos (volume constante). A pressão e a temperatura são diretamente proporcionais.



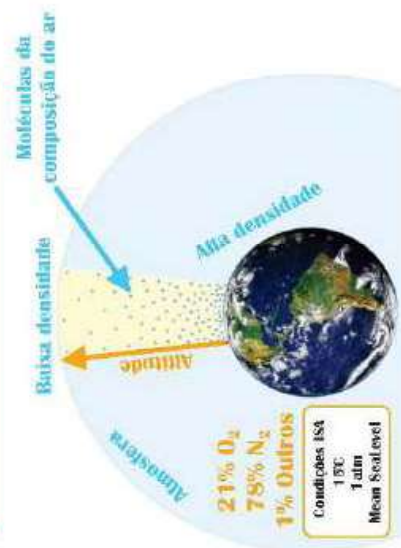
Conceitos Básicos - 2/3

Fluido

“Um fluido é uma substância que se deforma continuamente sob a aplicação de uma tensão de cisalhamento, não importando o quão pequeno seja esse valor.”
(Fox, 2012)



Atmosfera e Densidade



$$\text{Densidade} = \frac{\text{Massa}}{\text{Volume}} \left[\frac{\text{Kg}}{\text{m}^3} \right]$$

Densidade ISA = 1,225 $\frac{\text{Kg}}{\text{m}^3}$

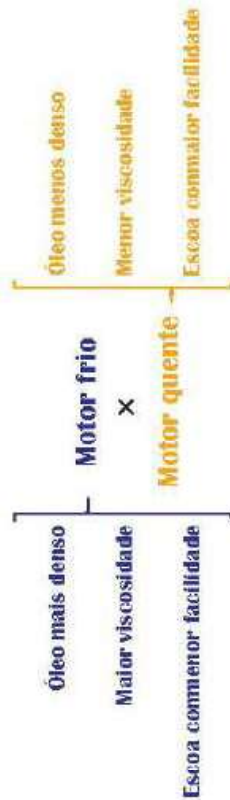
Massa

Densidade não é Massa!

Sistema Inglês **Sistema Internacional**
Libra (lb) **Quilograma (kg)**
1 lb = 0,454 kg = 454 g

Viscosidade

**Capacidade do óleo em escoar
Viscosidade é diferente de densidade!!**



A camada limite acontece devido ao atrito viscoso.

Escoamento laminar e turbulento

Próximo à parede, a velocidade do escoamento tende a ser zero!

