



STEM KIT

Guia do Professor

www.learn-fly.eu

Mafalda Guedes
Martinha Piteira
Nuno Nunes
Ricardo Cláudio

2019



Co-financiado por
Programa Erasmus+
da União Europeia

Este projeto foi financiado com o apoio da Comissão Europeia. Esta publicação (comunicação) vincula exclusivamente o autor, não sendo a Comissão responsável pela utilização que dela possa ser feita.

STEM KIT

Guia do Professor

2019

Parte Integrante do Projeto *Learn&Fly* - Materiais de aprendizagem e ferramentas de apoio para promover o envolvimento de estudantes em áreas científicas e carreiras do sector aeronáutico

Edição original (ISBN 978-989-54631-2-1)

STEM KIT

Teachers' Notebook

2019

Integrand part of Learn&Fly Project - Learning materials and support tools to foster engagement of students in science subjects and aeronautics-related careers

Autores:

Mafalda Guedes

Martinha Piteira

Nuno Nunes

Ricardo Cláudio

Escola Superior de Tecnologia de Setúbal, Instituto Politécnico de Setúbal, Portugal

Traduzido para Português pelos autores e por Daniela Geraldês, QSR Consulting

Programa ERASMUS+

KA2 - Cooperação para a inovação e o intercâmbio de boas práticas

KA201 - Parcerias estratégicas para educação escolar

Parceiros:

INNPULS Spolka z Ograniczona Odpowiedzialnosci, Poland

Fundacja Wspierania Edukacji przy Stowarzyszeniu "Dolina Lotnicza", Poland

Agrupamento de Escolas Sebastião da Gama, Portugal

INOVAMAIS - Serviços de Consultadoria em Inovacao Tecnológica S.A., Portugal

Instituto Politécnico de Setúbal, Portugal

QSR Consulting, Portugal

Fundacion para la Formacion Técnica en Maquina-Herramienta, Spain



Co-financiado por
Programa Erasmus+
da União Europeia

Este projeto foi financiado com o apoio da Comissão Europeia. Esta publicação [comunicação] vincula exclusivamente o autor, não sendo a Comissão responsável pela utilização que dela possa ser feita.

CONTEÚDOS

CONTEÚDOS	3
INTRODUÇÃO.....	6
1 UMA BREVE HISTÓRIA DA AVIAÇÃO	9
1.1 INTRODUÇÃO	9
1.2 AS PRIMEIRAS MÁQUINAS VOADORAS	9
1.3 ERA MODERNA: VOO MAIS LEVE QUE O AR	10
1.3.1 Balões.....	10
1.3.2 Dirigíveis.....	11
1.4 ERA MODERNA: VOO MAIS PESADO QUE O AR	12
1.4.1 Sir George Cayley.....	12
1.4.2 Propulsão a vapor	13
1.4.3 Planadores.....	14
1.4.4 Os irmãos Wright	15
1.4.5 A aviação como indústria	16
1.4.6 Utilização Militar: a Primeira Guerra Mundial (1914-1918).....	17
1.4.7 Outros marcos tecnológicos.....	17
1.4.8 Utilização Militar: a Segunda Guerra Mundial (1939-1945).....	18
1.4.9 Marcos tecnológicos no pós-guerra.....	18
1.4.10 Marcos tecnológicos nos anos 1980 e 1990.....	19
1.5 O SÉCULO XXI	19
2 MATERIAIS	22
2.1 INTRODUÇÃO	22
2.2 REQUISITOS DE MATERIAIS PARA AERONÁUTICA.....	27
2.3 MATERIAIS PARA AERONÁUTICA.....	29
2.3.1 Madeira	29
2.3.2 Alumínio	30
2.3.3 Plásticos Sintéticos.....	33
2.3.4 Compositos.....	34
3 Princípios de voo.....	37
3.1 Componentes de uma aeronave	37
3.2 AERODINÂMICA DE VOO	40
3.3 EIXOS DE MOVIMENTO DE AERONAVES.....	44
3.4 MASSA E EQUILÍBRIO.....	47
4 PROCESSOS E TECNOLOGIA	50

4.1	INTRODUÇÃO	50
4.2	INDÚSTRIA AEROESPACIAL.....	50
4.3	PROCESSOS E TECNOLOGIAS EM ENGENHARIA DE AERONAVES	50
4.3.1	Pesquisa.....	50
4.3.2	Desenvolvimento de produto.....	51
4.3.3	Fabricação	53
4.4	PROCESSOS DE FABRICAÇÃO AVANÇADOS NA INDÚSTRIA DE AERONAVES	55
4.4.1	Hidroformação de peças de chapa metálica	55
4.4.2	Usinagem de alta velocidade de componentes longos.....	56
4.4.3	Dobragem de tubos CNC.....	57
4.4.4	EDM de várias passagens de componentes complexos	58
4.4.5	Usinagem multitarefa	58
4.4.6	Disposição automatizada de peças compostas	59
4.4.7	Usinagem CNC de peças compostas	60
4.4.8	Fabricação aditiva	60
5	DESENHO TÉCNICO.....	66
5.1	Desenho TÉCNICO COM UMA FERRAMENTA DE COMUNICAÇÃO	66
5.2	INFORMAÇÃO CONTIDA NOS DESENHOS TÉCNICOS.....	66
5.3	DEVolvimento de produto	67
5.4	NORMALIZAÇÃO	67
5.5	TiPoS de REPRESENTAÇÃO	68
5.6	Sistemas de CAD.....	71
6	Projeto DE AERONAVES.....	72
6.1	GESTÃO DE PROJETO	72
6.2	Desenvolvimento de produTo.....	72
6.3	SUSTENTABILIDADE DO PRODUTO	73
6.4	REQUISITOS TÉCNICOS.....	74
6.5	FERRAMENTA PARA CONCEPTUALIZAR UM MODELO DE PLANADOR	74
6.6	Razãode planeio	76
6.7	Escolha Perfil Aerodinâmico.....	77
6.8	ARRASTO DA ASA.....	78
6.9	ESTABILIDADE LATERAL	79
6.10	SELEÇÃO DE MATERIAIS.....	80
6.11	FUSÍVEIS	80
6.12	DESENHOS.....	81
6.13	MASSA E EQUILÍBRIO	Error! Bookmark not defined.

6.14	COMO LANÇAR A AERONAVE.....	82
6.15	COMO MEDIR A DISTÂNCIA DE VOO	83
7	SIMULAÇÃO	84
7.1	INTRODUÇÃO	84
7.2	simulador de voo <i>X-PLANE</i>	84
7.3	<i>WORLD EDITOR</i> E <i>PLANE MAKER</i>	85
7.3.1	<i>World Editor</i>	85
7.3.2	<i>Plane Maker</i>	85
7.4	<i>X-PLANE</i>	86
8	Moodle	87
8.1	INTRODUÇÃO À PLATAFORMA MOODLE.....	87
8.2	STEM KIT E O MOODLE	87
8.2.1	Acesso à plataforma Moodle.....	88
8.3	ESTRUTURA DO CURSO STEM KIT NO MOODLE.....	90
8.3.1	Visão geral do curso	90
8.3.2	Seção relativa os regulamentos do Desafio Learn & Fly	91
8.3.3	Seção correspondente aos módulo	92
8.3.4	Seção: testes	93
8.4	Secção Get Social.....	94
8.5	O curso STEM KIT e a Gamificação	94
8.5.1	Medalhas – Como podem os Professores consultar as medalhas obtidas pelos estudantes	94
8.5.2	Testes Online (quizzes) – Como consultar os resultados dos testes.....	96
8.6	Relatórios do Desafio - UPLOAD E DOWNLOAD.....	97
8.6.1	Upload do Relatório pelos estudantes.....	97
8.6.2	Download dos Relatórios pelos professores	99
	REFERENCIAS	100

INTRODUÇÃO

O Projeto Learn&Fly propõe desenvolver o interesse e as capacidades básicas dos jovens estudantes nas áreas da ciência, tecnologia, engenharia e matemática (STEM) recorrendo ao tema da aeronáutica.

O voo é um tema fascinante para a maioria das pessoas. É uma paixão especialmente acarinhada pelos jovens, possivelmente pela liberdade e mistério que transmite, associado ao charme e à avaliação social de muitas profissões relacionadas com a aeronáutica. Por outro lado, o voo com motor representa uma incrível conquista tecnológica, exigindo uma enorme capacidade técnica e tecnológica e o cruzamento de conhecimentos em muitas áreas disciplinares STEM, incluindo matemática, ciência da computação, física, ciência de materiais, eletrónica, automação, controlo, mecânica de fluidos, entre muitos outros. O Learn & Fly propõe a interseção desses recursos como uma maneira de incentivar e de capacitar os estudantes a continuarem os seus estudos nas disciplinas STEM. Ao mostrar a sua importância e aplicação na aeronáutica, o Projeto permite mostrar a necessidade dos temas STEM com que os jovens se deparam para resolver os vários problemas técnicos.

A abordagem seguida é baseada no objetivo de construir uma aeronave com materiais simples, a ser testada numa competição de voo, designada por Learn & Fly Challenge. É um processo prático e envolvente. O facto de ser uma aprendizagem centrada no aluno e baseada em problemas semelhantes aos reais, potencia a motivação dos alunos, além de promover o pensamento crítico e o espírito de equipe. O Learn & Fly inclui o Kit para Estudantes, o Kit para Professores e o Kit de Carreiras.

O desenvolvimento do Projeto Learn & Fly foi previsto no âmbito de Clubes Aeronáuticos, onde os estudantes são obrigados a estudar fundamentos da ciência e processamento de materiais, física e mecânica de voo, e o projeto de aeronaves no sentido de evoluírem para a construção de um modelo de planador segundo regras pré-estabelecidas. A documentação sobre estes assuntos está dividida em sete módulos, cada um baseado num conjunto de slides, que acompanham o processo de construção do planador e as necessidades que surgem, tanto teóricas como práticas. Os slides atrás referidos, alguns dos materiais para iniciar a construção do planador e o regulamento da competição constituem o Kit do Aluno.

O Kit para Professores inclui este Caderno, além dos slides, para auxiliar o professor nas disciplinas que não fazem parte da sua formação académica. O Caderno está organizado em oito capítulos. Os sete primeiros correspondem aos sete módulos que compõem os slides. Em cada um desses capítulos, são apresentados alguns detalhes sobre a matéria correspondente, para que o professor se possa preparar de forma acessível e rápida para a aula. O oitavo capítulo esclarece e auxilia o uso da plataforma de e-learning Moodle no quadro do projeto. Isso inclui disponibilizar conteúdos para os estudantes, aceder a projetos dos alunos, trocar dados entre parceiros, estabelecer e participar em fóruns e chats, propor e corrigir testes de verificação para avaliação e nivelamento do conhecimento dos estudantes. Este documento é, portanto, um guia simples para auxiliar os professores na tarefa de implementar o Learn & Fly nas aulas (Figura 1).

O Kit de Carreiras é um banco de dados dinâmico que lista de maneira abrangente os vários empregos e oportunidades de carreira na indústria aeronáutica (projeto e produção aeronáutica), transporte aéreo e operações de voo (pilotagem, técnicos de manutenção, serviços de assistência em terra e operações de voo). Este Kit fornece uma lista de oportunidades de carreira relacionadas com a aeronáutica (com descrição da tarefa e condições de trabalho), estatísticas de emprego e depoimentos de profissionais. Espera-se que este kit

funcione como uma ferramenta de suporte de aconselhamento de carreira para estudantes e adultos (pais, professores e outros funcionários de apoio à educação).

O desafio Learn & Fly é orientado de modo a envolver os estudantes no desenvolvimento e construção de um modelo de planador, seguindo procedimentos e tarefas semelhantes a um projeto aeronáutico real, Figura 1. De acordo com os regulamentos do Learn & Fly Challenge, esta competição pode ser dividida em duas edições, nacional e internacional. Dependendo do envolvimento da escola, diferentes abordagens podem ser adotadas para as edições nacional e internacional. Por exemplo, uma escola pode transformar a edição nacional num desafio entre equipas diferentes da mesma escola. Os vencedores de diferentes escolas podem posteriormente competir, seguindo as regras do desafio internacional.

No desafio nacional, os estudantes devem construir um modelo de planador, seguindo alguns requisitos, com um orçamento máximo de 50 €. É fornecida uma lista com materiais simples e fáceis de adquirir no comércio local. Esses materiais, juntamente com as informações que constam nos slides, permitem que os estudantes construam com facilidade um planador que terá capacidade para voar. Para tal é necessário que a escola forneça um local para os estudantes trabalharem com algumas ferramentas básicas, como serras manuais, alicates, fita métrica e brocas. Mesmo que a escola não tenha essas ferramentas disponíveis é provável que a maioria dos estudantes as tenha em casa. Além do desenvolvimento do planador, os alunos devem escrever um relatório seguindo um modelo fornecido, onde constem algumas informações técnicas sobre o planador projetado e construído. No final, os estudantes devem apresentar o planador construído e lançá-lo para um voo de demonstração e de validação. De acordo com as regras do regulamento, a equipa que obtenha maior pontuação é a vencedora. Os estudantes que respondam corretamente aos questionários propostos na plataforma Moodle relacionados com os slides fornecidos no Kit para Estudantes poderão ganhar lançamentos extras do planador na competição final.

Os participantes do desafio internacional são os vencedores dos desafios nacionais. Essas equipas devem melhorar os seus planadores e adicionar uma hélice movida por um 'motor' elástico. O orçamento para esta alteração tem um orçamento limite de 50 €. Um novo relatório deve ser elaborado em inglês onde devem ser incluídas estas alterações.

Ambos os desafios devem terminar com um concurso onde os estudantes apresentam os seus planadores a um júri e realizam a competição de lançamento do planador. Após apuramento da pontuação obtida realizar-se-á a cerimónia de entrega de prémios correspondentes. É também uma oportunidade para a apresentação do kit de carreiras, envolvendo alunos, pais, professores, instituições de ensino superior, empresas e autoridades governamentais.

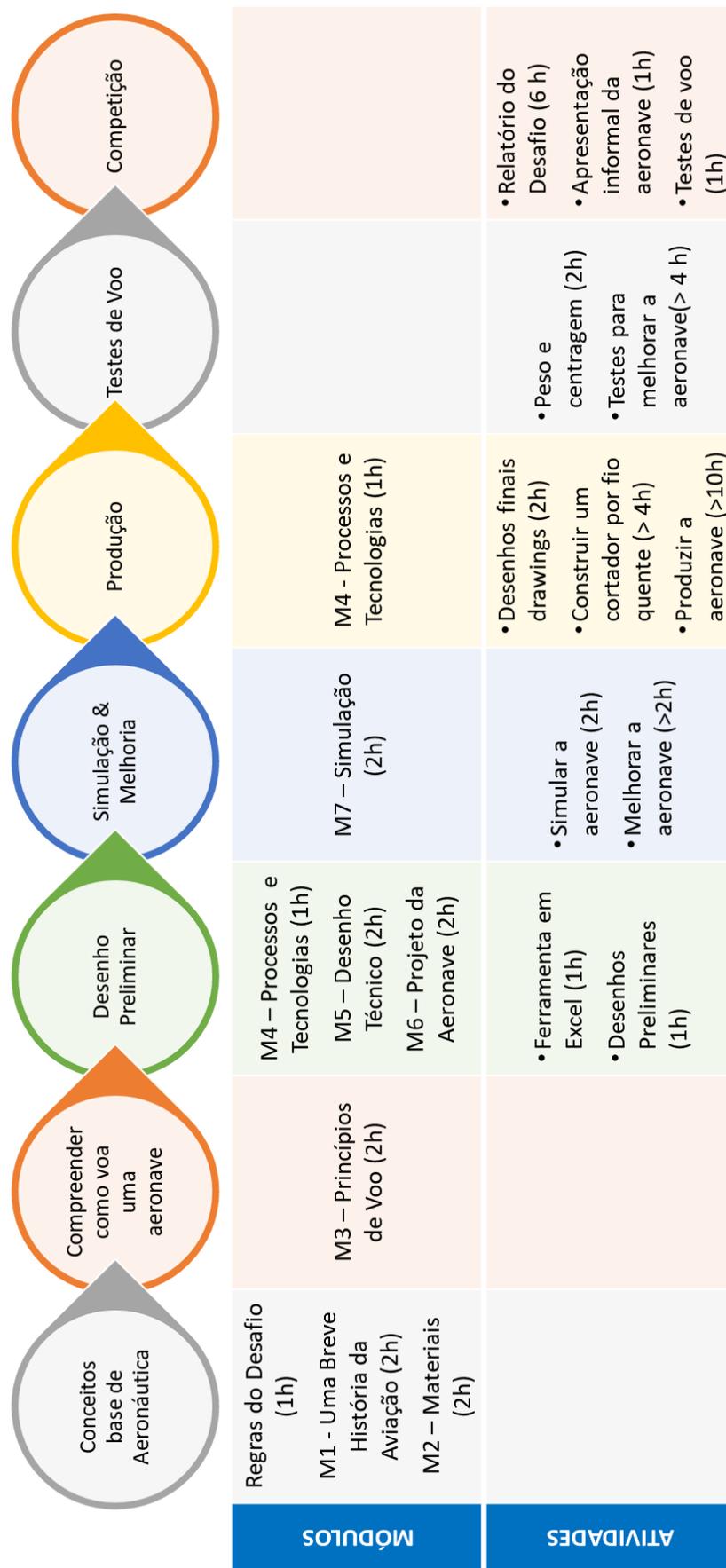


Figura 1 – Esquema de desenvolvimento das atividades do Learn&Fly .

1 UMA BREVE HISTÓRIA DA AVIAÇÃO

A palavra “aviação” foi usada pela primeira vez em 1863 pelo pioneiro Guillaume de La Landelle, a partir do latim “avis” (ave).

A palavra “aeroplano” foi criada em 1871-1872 por Francis Herbert Wenham para descrever as asas rígidas de um besouro, associando asas longas e finas a maior facilidade de decolagem do que asas curtas e espessas com a mesma área.

O termo “aeroespacial” foi usado pela primeira vez em 1959 por Thomas D. White, Chief of Staff da força aérea norte-americana, pretendendo descrever o atmosfera e espaço como “um meio operacional indivisível que consiste na extensão total para além da superfície da Terra”. The term “aviation” was coined in 1863 by pioneer Guillaume de La Landelle, from the Latin “avis” (bird).

1.1 INTRODUÇÃO

Inventado no século XX, o avião incorpora a ideia de modernidade e mudou o mundo para sempre, transportando a sociedade para o futuro e afetando a vida humana de muitas e diferentes formas [1]. O voo uniu os seres humanos e incentivou a homogeneização de diversas culturas. Permitiu que famílias espalhadas pelo mundo mantivessem contato pessoal [1]. Abriu os cantos mais distantes do globo ao comércio, transformou pessoas comuns em viajantes, criou novas indústrias e negócios para atender às necessidades de viajantes e turistas e abriu vastas áreas do planeta para estudo, ocupação e exploração económica [1]. Por outro lado, também tornou possível a rápida disseminação de vírus e doenças, e redefiniu a forma como as guerras são travadas [1]. Além de seu impacto na sociedade, cultura, guerra e comércio, a indústria aeroespacial impulsionou o desenvolvimento da tecnologia do século XX, desde o desenvolvimento de novos materiais até a introdução da computação eletrónica e a novas abordagens para a gestão da complexidade [1].

A história da aviação estende-se por mais de dois mil anos, desde as primeiras formas de voo, como asas artificiais, papagaios e tentativas de saltos de torres, até ao voo supersônico e hipersônico por jatos mais pesados do que o ar. Hoje em dia, numa época em que as viagens aéreas são comuns e os humanos estabeleceram uma posição permanente no espaço, o voo continua a inspirar o mesmo sentimento de reverência, magia e poder do que nos primórdios da história da aviação [1].

1.2 AS PRIMEIRAS MÁQUINAS VOADORAS

Os seres humanos sempre sonharam em voar, como testemunham os mitos e lendas de várias culturas envolvendo tapetes voadores, cabos de vassoura, penas coladas e asas artificiais [2]. Não sonhavam no entanto com o Boeing 747: o voo ambicionado era o das aves e dos insetos. Os registos históricos abundam em relatos de “saltadores de torres” que se lançavam no ar suportados apenas por convicção cega e por asas fracamente improvisadas, “máquinas voadoras” envolvendo mecanismos para bater asas, ou papagaios [2], e a ilusão de que uma pessoa poderia voar como um pássaro custou muitas vidas.

Voar foi uma obsessão também durante o Renascimento. Leonardo da Vinci (1452-1519) acreditava que o voo mecânico era possível e alcançável através da observação cuidadosa e do estudo dos princípios básicos associados ao voo na natureza [1]. O seu sonho exprimiu-se em vários projetos de máquinas de voo artificial com base nesses princípios [1,2]. Os seus desenhos de um ornitóptero (Figura 2a), de um paraquedas (Figura 2b), e de um helicóptero (Figura 2c) estão entre as imagens mais familiares do Renascimento, embora não tenha tentado construir nenhum deles. Da Vinci era um homem à frente do seu tempo e da história da dinâmica de fluídos, mas destaca-se como um gigante solitário entre os gregos e os precursores da revolução científica do século XVII [1]. No entanto, manteve os seus cadernos ciosamente secretos, e as ideias que poderiam tê-lo qualificado como o fundador da aerodinâmica permaneceram desconhecidos até o século XIX.

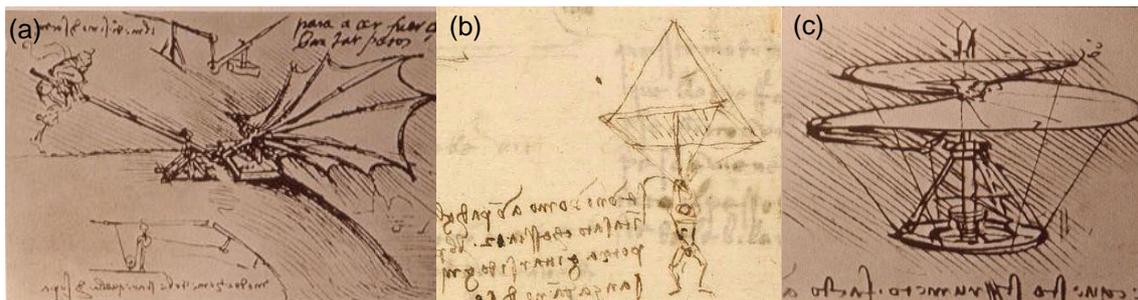


Figura 2 - Desenhos de Leonardo da Vinci: (a) ornitóptero, (b) paraquedas; e (c) helicóptero (imagens em domínio público).

1.3 ERA MODERNA: VOO MAIS LEVE QUE O AR

Os fundamentos da teoria aerodinâmica foram desenvolvidos por gerações de pensadores brilhantes que desconheciam os estudos de da Vinci e que não tinham o menor interesse em voar. Investigadores incluindo Galileo Galilei (1564-1642), Edme Marriot (1620-1684), Christiaan Huygens (1629-1695) e Isaac Newton (1642-1727) estabeleceram a ciência da mecânica, as leis do movimento e noções básicas sobre dinâmica dos fluídos, e desenvolveram os princípios fundamentais da aerodinâmica [1]. Outras figuras significativas incluem Daniel Bernoulli (1700-1782), Jean d'Alembert (1717-1783), Leonhard Euler (1707-1783), Joseph-Louis Lagrange (1736-1813) e Pierre-Simon de Laplace (1749-1827), que estabeleceram os princípios físicos e matemáticos fundamentais do escoamento de fluídos [1].

1.3.1 Balões

Os filósofos dos séculos XVII e XVIII que estudaram a física e a química da atmosfera estabeleceram os fundamentos necessários à invenção do balão. Trabalhos iniciais estabeleceram que a atmosfera podia ser retirada (bombeada) de um recipiente fechado, tal como qualquer outro fluido, e firmaram as leis da física explicando o comportamento do “ar”, o único gás conhecido até então [1]. Isto teve consequências tecnológicas profundas em vários campos e inspirou a aspiração do voo sustentado, incluindo as tentativas de Francesco Lana de Terzi (1670) e de Bartolomeu Lourenço de Gusmão (1709) para construir estruturas com interior mais leve do que a quantidade de ar por elas deslocado. No entanto, foi a análise dos constituintes da atmosfera no século XVIII que conduziu diretamente à invenção do balão [1]. Em 1765 Joseph Black identificou o azoto, em 1774 Joseph Priestley identificou o oxigênio, em 1775 Henry Cavendish identificou o hidrogênio [1]. A descoberta de um gás muitas vezes mais leve do que o ar (a densidade do ar é de 0.001225 g/cm^3 [3], versus $0.00008988 \text{ g/cm}^3$ para o hidrogênio) inspirou químicos a explorarem quanto peso esse gás poderia sustentar, e em

1780 Black propôs que se se hidrogénio gasosos enchesse um balão, o objeto inflado poderia ascender no ar. Inspirado pela nova ciência da atmosfera e pelo trabalho em pneumática dos químicos ingleses, vários franceses começaram a conduzir as suas próprias experiências. 1783 foi um ano crucial para o balonismo, atingindo-se seis pontos altos entre junho e dezembro, em França:

- **4 de junho:** os irmãos Joseph e Étienne Montgolfier demonstraram o seu balão de ar quente não tripulado em Annonay, France. O balão consistia numa leve estrutura em madeira, coberta por papel e tafetá, e cheia com ar quente [1].
- **27 de agosto:** Jacques Charles e os irmãos Robert (que tinham desenvolvido um processo para revestir tecido com borracha natural, tornando-o impermeável) lançaram o primeiro balão não-tripulado cheio com hidrogénio, a partir do Champ de Mars em Paris. Uma multidão acompanhou o enchimento do balão (que começou a 23 de agosto) e esteve presente no lançamento; um dos espetadores foi Benjamin Franklin [4]. Após 45 minutos o balão aterrou a 21 km na aldeia de Gonesse, onde os aterrorizados camponeses locais o atacaram com forquilhas e facas, destruindo-o [4].
- **19 de setembro:** os irmãos Montgolfier lançaram o primeiro balão transportando seres vivos, uma ovelha, um pato e um galo, dentro de um cesto acoplado. Os animais aterraram em segurança.
- **19 de outubro:** os irmãos Montgolfier lançaram o primeiro voo tripulado, um balão com amarração em terra transportando seres humanos a bordo de um cesto, Paris. Os aviadores foram o cientista Jean-François Pilâtre de Rozier, Jean-Baptiste Réveillon, e Giroud de Villette.
- **20 de novembro:** os Montgolfiers lançaram o primeiro balão sem amarração transportando passageiros humanos, Pilâtre de Rozier e François Laurent. Percorreram 8 km, sendo o balão alimentado por um fogo de madeira.
- **1 de dezembro:** Jacques Charles e Nicolas-Louis Robert lançaram um balão de hidrogénio tripulado a partir do Jardin des Tuileries em Paris, testemunhado por uma multidão de 400000 pessoas. Ascenderam a uma altura de cerca de 1800 pés (550 m) e aterraram após um voo de 2 horas e 5 minutos, cobrindo uma distância de 36 km [4].

No final do século XVIII o balonismo tornou-se uma moda popular na Europa, capturando a imaginação pública, arrastando multidões para demonstrações de voo e transformando os aviadores em heróis nacionais. O balonismo forneceu também a primeira compreensão detalhada da relação entre altitude e a atmosfera [2].

1.3.2 Dirigíveis

O interesse do conde prussiano Ferdinand von Zeppelin (1838-1917) (Figura 3 a)) em dirigíveis inspirou-se numa visita aos Estados Unidos durante a Guerra Civil Americana, onde testemunhou o uso de balões com amarração como postos de observação militar [2]. A partir de 1891 devotou a sua fortuna pessoal ao desenvolvimento de dirigíveis motorizados, definindo o primeiro projeto em 1898 [1]. Ao contrário dos balões, a forma do contentor cheio de hidrogénio era mantida por uma estrutura sólida em vez de pela pressão do gás no interior [2]. Apesar de numerosos reveses, o primeiro dirigível Zeppelin, o LZ-1 (com 128 m de comprimento e operado por uma tripulação de 5 pessoas, Figura 3 b)), fez o seu voo de estreia a 2 de julho de 1900. No entanto mostrou-se difícil de controlar e demasiado grande e pesado para a potência disponível, sendo imediatamente abandonado. O conde Zeppelin e o seu projetista, Ludwig Dür

(1878-1956), começaram então a trabalhar no LZ-2 (que se destruiu no seu segundo voo), no LZ-3 (que completou dois voos de 2 h cada em 9 e 10 de outubro de 1906), e no LZ-4 (podia efetuar voos com duração até 8 h; foi destruído no chão por uma tempestade) [1,2]. Em 1910 os zepelins começaram serviço de passageiros. Sob a direção de Dürr as características e funcionalidade dos dirigíveis foram continuamente melhoradas e a partir de 1914 uma nova liga de alumínio (Duraluminium, § Módulo 2) passou a ser usada para construir a estrutura. Novos motores mais potentes foram introduzidos, permitindo ao LZ-26 transportar uma carga de 12.7 ton a mais de 80km/h. Em 1914 os dirigíveis Zeppelin tinham já transportado mais de 37000 passageiros [2]. Foram desenvolvidos dirigíveis também em outros países, mas apenas na Alemanha alcançaram o estatuto de ícones nacionais [2]. Durante a Primeira Guerra Mundial os militares alemães fizeram uso extensivo de zepelins como batedores e bombardeiros, matando mais de 500 pessoas em raids sobre a Grã-Bretanha. A derrota da Alemanha em 1918 desacelerou o negócio dos dirigíveis, porque sob os termos do Tratado de Versailles a Alemanha estava proibida de construir dirigíveis de grandes dimensões. Essas restrições foram levantadas em 1926 e iniciou-se a produção do LZ-127 Graf Zeppelin (Figura 3 c), revitalizando a companhia. Durante os anos 1930 os zepelins operaram regularmente voos transatlânticos para o Brasil e a América do Norte (a espiral do Empire State Building foi originalmente projetada para servir de mastro de amarração para dirigíveis, tendo-se depois descoberto que a exposição aos ventos o tornava impossível) [5]. Foi o desastre de Hindenburg em 1937, em que o LZ-129 Hindenburg se incendiou durante a tentativa de amarração ao mastro da Naval Air Station Lakehurst fazendo 36 baixas, juntamente com questões políticas e económica, que puseram termo à indústria de dirigíveis.

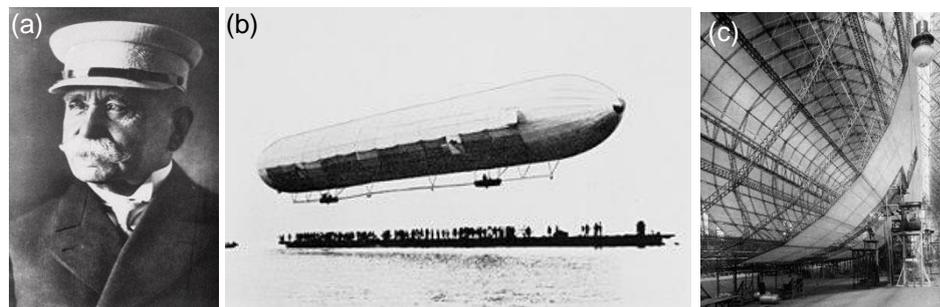


Figura 3 - (a) Ferdinand von Zeppelin; (b) LZ-1, the first zeppelin; (c) the Graf zeppelin under construction.

1.4 ERA MODERNA: VOO MAIS PESADO QUE O AR

No final do século XIX os esforços práticos para progredir no voo tripulado mais pesado que o ar dividiam-se em duas abordagens [2]. A primeira focava-se na propulsão, ambicionando desenvolver um motor suficientemente poderoso para sustentar um homem e uma máquina no ar. A outra baseava-se no voo sem propulsão à semelhança e inspirado no voo de aves e insetos na natureza.

1.4.1 Sir George Cayley

Sir George Cayley (1773-1857) é uma das figuras mais notáveis na história da aeronáutica e é considerado o pai fundador da navegação mecânica aérea [1]. Contribuiu para diversos campos da ciência e tecnologia, incluindo arquitetura, ferrovia, botes salva-vidas e próteses. A sua grande paixão foi no entanto o sonho da “navegação aérea”. Identificou o voo mais pesado do que o ar como um problema resolúvel através de investigação e desenvolvimento científico e

tecnológico; estabeleceu um número significativo de princípios básicos em aerodinâmica; e atuou como o primeiro engenheiro aeronáutico, projetando, construindo e voando os primeiros planadores de asa fixa capazes de transmitir uma sensação de voo autônomo [1]. Em 1799, gravou num dos lados de um pequeno disco de prata (Figura 3a) a sua concepção de uma máquina voadora como um dispositivo de asa-fixa, com sistemas separados para sustentação, propulsão e controle; gravou no outro um notável diagrama das forças aplicadas na asa durante o voo.

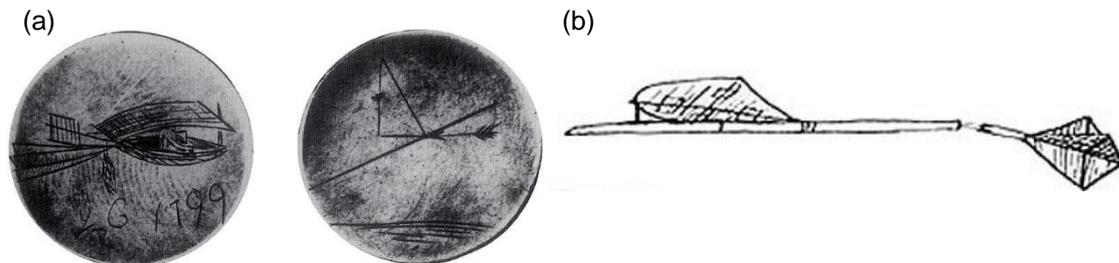


Figura 4 - George Cayley: (a) Disco de prata com a primeira ilustração daquilo que veio a evoluir para o avião moderno; no outro lado está a gravação do primeiro diagrama aerodinâmico de forças numa asa (British Science Museum, em domínio público). (b) Projeto da primeira aeronave (1804).

Em 1804, Cayley projetou e construiu a sua aeronave (Figura 3b), predecessora de todas as máquinas voadoras de asa fixa [1]. Consistia numa haste horizontal com 120 cm de comprimento, acoplado a três sistemas: um papagaio, colocado num ângulo de seis graus em relação à horizontal, a servir de asa; um peso, capaz de ser posicionado para alterar o centro de gravidade e manter o equilíbrio; uma cauda cruciforme montada numa junta universal que atuava como elevador e leme. Cayley melhorou e refinou continuamente este desenho ao longo dos anos, culminando em versões finais e desenvolvidas (1849 e 1852) do seu projeto inicial para um planador pilotado. As mais importantes contribuições do trabalho aeronáutico de Cayley forneceram uma fundação sólida para a pesquisa aeronáutica que se seguiu, e incluem [1]:

- Confirmação de sugestões anteriores de que uma asa com camber resulta em maior sustentação do que uma asa plana com baixo ângulo de ataque.
- Identificação de uma região de baixa pressão na superfície superior de uma asa com camber e de uma área sob alta pressão na superfície inferior, durante o voo.
- Sugestão de dispor a ponta das asas em ângulo acima da linha central da aeronave formando um ângulo diedro, o que resulta em estabilidade lateral.
- Desenvolvimento dos primeiros estudos sobre o movimento do centro de pressão nas asas da aeronave durante o voo.
- Desenvolvimento do cálculo do desempenho de uma aeronave.

Os cálculos de Cayley sobre sustentação e arrasto, e as suas notas sobre possibilidades de estabilização e controlo de aeronaves constituíram uma base sólida para progressos em direção ao voo mais pesado que o ar [2].

1.4.2 Propulsão a vapor

O despertar do interesse público no voo mais pesado que o ar teve lugar 30 anos após a publicação da pesquisa de Cayley, e foi provocado pelo sucesso do motor a vapor aplicado a sistemas de transporte: comboios e barcos a vapor diminuíram consideravelmente o tempo de

viagem por terra e por mar [2]. O vapor foi o primeiro meio de propulsão experimentado em voo [2] e o primeiro experimentador consistente foi o francês Félix de la Croix (1823-1890). Nos anos 1850, juntamente com o seu irmão Louis, projetou e voou um aeroplano modelo motorizado primeiro por um mecanismo de relógio e depois por um motor a vapor em miniatura [2]. Patenteou então o projeto de um monoplano em tamanho real com motor a vapor de baixo peso e com a surpreendente melhoria de um trem de aterragem retrátil, que foi construído e testado em 1874. A aeronave desceu uma rampa, sustentou-se brevemente no ar e caiu em terra [2]. Este foi também o destino de várias outras experiências de voo com propulsão, já que os seus inventores deram pouca ou nenhuma importância ao controlo da aeronave uma vez no ar. Em contraste, os seus contemporâneos do voo sem propulsão esperavam fazer progressos através da acumulação de experiência de voo.

1.4.3 Planadores

Contrastando com os adeptos do voo motorizado, os experimentadores do voo não-motorizado esperavam progredir através da imitação do voo das aves. O líder indiscutível da estratégia do “homem voador” foi o alemão *Otto Lilienthal* (1848-1896) [2]. Os voos de *Lilienthal* descendo uma colina contra o vento carregado com grandes asas parecidas com as dos pássaros e elevando-se num voo planado que o mantinha acima do solo eram um espetáculo impressionante, e muito mais científico do que aparentava. A partir do escrupuloso estudo da anatomia e voo das aves, *Lilienthal* concluiu que uma asa arqueada (i.e., com camber) era essencial para produzir sustentação; estudou aerodinâmica sistematicamente através do desenvolvimento de experiências com equipamento de ensaio construído propositadamente para determinar qual a forma exata da asa (i.e., o seu perfil aerodinâmico) resultante em máxima sustentação, e comprometeu-se com a experimentação voando ele mesmo [2]. Cedo percebeu que as experiências de batimento de asas eram vãs, e começou a exploração mais frutuosa do potencial de planadores de asa fixa. Entre 1891 e 1896 *Lilienthal* construiu 16 planadores diferentes, sobretudo monoplanos mas também biplanos. Eram estruturas leves e frágeis, construídas esticando um tecido de algodão sobre nervuras de salgueiro e bambu. Voavam, mas como não tinham sistema de controlo, *Lilienthal* tinha que lançar o seu corpo contra a estrutura na direção necessária para manter o equilíbrio e estabilidade entre correntes de ar em deslocamento. A 9 de agosto de 1896 o planador de *Lilienthal* foi apanhado numa rajada de vento, entrou em perda e despenhou-se; o aviador morreu no dia seguinte. No total *Lilienthal* fez mais de 2000 voos, o mais longo cobrindo uma distância de 350 m [2].

As experiências com planadores forneceram os alicerces para o desenvolvimento de aeronaves mais pesadas que ar, e mostraram que o voo teria que envolver propulsão para ter utilidade prática, [2]. No final do século XIX tornou-se mais viável alguma forma ligação de um motor a um planador através do desenvolvimento do motor de combustão interna, que tinha o potencial de gerar mais potência/peso do que qualquer motor a vapor [2]. O americano *Samuel Langley* (1834-1906), cientista no *Smithsonian Institute em Washington D. C.*, foi um detrator de *Lilienthal* e dos seus seguidores. Acreditava que a aplicação de potência suficiente a uma máquina aerodinamicamente estável resolveria o problema do voo, e investigou as questões práticas relacionadas [2]. Em 1896, construiu o Aerodrome, um modelo propulsionado a vapor que voou 1200 m. Dedicou-se então ao desenvolvimento de um motor a gasolina para o seu aeroplano, mas levou vários anos a desenvolver a relação potência/peso necessária. O projeto terminou em dezembro de 1903, quatro anos fora de prazo e muitos dólares acima do orçamento. A enorme máquina voadora resultante era aerodinâmica e estruturalmente instável, e não tinha sistema de controlo adequado. Não funcionou, mergulhando diretamente

no rio *Potomac* no voo de lançamento [2]. Ironicamente, o sucesso foi alcançado apenas 9 dias depois pelos irmãos *Wright* [2].

1.4.4 Os irmãos Wright

O sucesso no voo tripulado com propulsão foi alcançado quando as abordagens de voo com e sem propulsão se conjugaram na estratégia desenvolvida pelos irmãos *Wright* [2]. É aceite (embora não universalmente) que os irmãos *Wright* foram os inventores da primeira máquina mais pesada do que o ar capaz de voo sustentado, controlado e com propulsão [2]. Wilbur (1867-1912) e Orville (1871-1948) *Wright* cresceram em Dayton, Ohio, mas mantinham-se em contacto estreito com as correntes contemporâneas de pensamento e novação. Interessaram-se profundamente pelas experiências de voo publicitadas nos anos 1890, e a partir de 1899 começaram a financiar as suas experiências aeronáuticas com os lucros do seu negócio de bicicletas (estimaram que lhes custou 1000 USD resolver o problema do voo com propulsão) [2]. Inicialmente apenas alugavam bicicletas na sua loja, mas rapidamente passaram à construção dos seus próprios modelos. Esta experiência na construção de algo inerentemente tão instável como uma bicicleta e a compreensão que lhes proporcionou sobre a combinação de leveza e força necessária para obter equilíbrio e controlo, deram-lhes uma nova abordagem ao problema de desenvolver uma máquina voadora controlável mais pesada que o ar [2]. A disponibilidade de matérias-primas e maquinaria na sua bem equipada oficina ajudou-os na investigação do problema de voar, que os *Wright* abordaram sistematicamente. Quiseram primeiro absorver o conhecimento existente e escreveram uma carta ao Smithsonian Institute solicitando que lhes fossem enviados todos os artigos científicos disponíveis no arquivo sobre voo e uma lista de livros sobre o assunto. Essa carta recebeu resposta pronta e solícita, permitindo aos irmãos ganharem familiaridade com os trabalhos de Cayley, Lilienthal, Chanute (um pioneiro do projeto de planadores) e Langley, entre muitos outros. Uma vez que perceberam que uma máquina voadora é um pouco como uma bicicleta, no sentido de ser pilotada com constante ajuste de equilíbrio, imediatamente identificaram uma área que tinha sido negligenciada até então: o controlo [2]. Desde o início os *Wright* puseram o problema não simplesmente sobre como construir uma máquina voadora, mas também sobre como voá-la. Obtiveram inspiração do estudo do voo de pássaros e insetos e o seu primeiro avanço veio da observação de abutres [6]: Wilbur percebeu que é o movimento das penas nas pontas das asas que mantem o equilíbrio lateral da ave, e imaginou que um efeito semelhante poderia ser alcançado numa asa de aeronave, concebendo a deflexão da asa. Em 1900, os irmãos tinham construído o seu primeiro planador na oficina de bicicletas e começaram experiências de voo em Kitty Hawk, na Carolina do Norte. Escolheram esta pequena povoação por causa dos ventos frequentes e areais macios, adequados às suas experiências com planadores, que levaram a cabo ao longo de 3 anos antes dos voos com propulsão [6]. Durante esse tempo efetuaram um conjunto notável de experiências sobre projeto de asas: no seu túnel de vento caseiro determinaram a sustentação criada por várias combinações (cerca de 200) do tamanho, forma, curvatura e perfil da asa, movendo-se com diferentes velocidades e ângulos [2] (Figura 5). Isso resultou numa base de dados altamente precisa que os *Wright* aplicaram ao projeto de asas. No final do verão de 1902 conseguiam planar até 200 metros de modo controlado, permanecendo no ar até 26 segundos. Nessa altura sentiram-se prontos para tentarem o voo com propulsão, para o qual necessitavam de um motor e de uma hélice. Uma vez que as companhias automóveis não conseguiram fornecer um motor adequado, o seu assistente Charlie Taylor desenvolveu um notável motor a gasolina com 82 kg e entrega de 12 cv. O desenvolvimento da hélice revelou-se um problema mais complexo, forçando-os a estudar várias matérias de física e matemática. No final de

setembro de 1903 voltaram a Kitty Hawks para testar a máquina voadora que construíram, mas tiveram vários reveses com motor e hélice, atrasando o seu sucesso. A 17 de dezembro de 1903, o sonho foi finalmente alcançado quando o Wright Flyer I voou durante 59 segundos durante os quais percorreu 260 metros, com Orville aos comandos. Esta primeira máquina voadora motorizada (Tabela 1) foi construída com madeira de abeto e de freixo, musselina e cordas de piano, e foi lançada de um monocarril de madeira. O piloto posicionava-se deitado de cara para baixo, num intervalo sob a asa, um posição que minimizava o arrasto. O motor, instrumentos de voo e um anemómetro estavam posicionados à sua direita. A aeronave era controlada em inclinação horizontal por com um elevador móvel na frente do piloto, em movimento vertical por lemes verticais duplos, e em rolamento ela torção das asas (deflexão) [2].

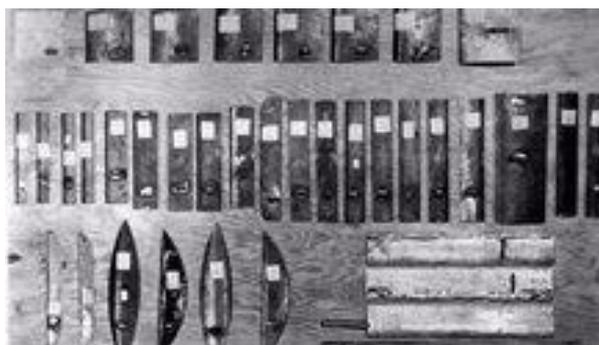


Figura 5. Alguns modelos de perfis aerodinâmicos testados pelos irmãos Wright [2].

Table 1. Especificações técnicas do Wright Flyer I [2].

Motor	Motor a gasolina de 4 cilindros de 12 cv arrefecido a água
Envergadura	12.3 m
Comprimento	6.4 m
Altura	4.1 m
Peso	274 kg
Velocidade máxima	48.3 km/h

Os irmãos *Wright* prosseguiram os seus esforços para construir e testar modelos aperfeiçoados da sua máquina voadora. Entre junho e outubro de 1905 fizeram voos de até 38 minutos no muito melhorado Flyer III, cobrindo mais de 30 km de cada vez. Os irmãos tomaram então a decisão de cessar todas as experiências de voo, dedicando seus esforços à procura de contratos comerciais lucrativos. A maioria dos aspetos de seu trabalho era conhecida dos entusiastas da aviação e cedo muitos desafiaram suas conquistas.

1.4.5 A aviação como indústria

Durante 1907 *Louis Blériot* e *Robert Esnault-Pelterie* alcançaram pequenos voos em monoplanos à tração (i.e., motorizados à frente), uma configuração que viria a desempenhar um papel crucial na evolução do voo [2]. Os aviadores franceses tinham à sua disposição a primeira fábrica de aeroplanos, estabelecida em 1906 pelos irmãos *Gabriel* e *Charles Voisin* (em 1908 tinham já produzido mais de 10000 aeronaves). Em 1907 *Léon Delagrangé* e *Henri Farman* abordaram-nos individualmente com versões modificadas dos biplanos Voisin. Basicamente eram semelhantes ao *Wright Flyer I*, mas com estrutura de cauda em caixa tipo papagaio e ausência de qualquer forma de controlo lateral [2]. Ambos os homens aprenderam rapidamente a voar as suas máquinas, fazendo uma série de voos cada vez mais impressionantes. Em janeiro de 1908 Farman percorreu um circuito de 1 km; em junho *Delagrangé* permaneceu no ar mais de 18 mais; em julho Glenn Curtiss (EUA) fez o primeiro voo superior a 1 milha (1.6 km); em outubro Farman (após outras modificações, incluindo a adição de quatro grandes ailerons às asas) fez o primeiro voo cross-country, cobrindo 27 km em 20 min [2]. As máquinas de voo com propulsão estavam finalmente a transformar-se em aeronaves motorizadas, e em julho de 1909 Louis Blériot fez o primeiro voo sobre o Canal da Mancha. Teve assim início uma nova fase na conquista do ar, transformando a aviação de um objeto de curiosidade numa obsessão moderna que capturou a imaginação popular.

As primeiras aeronaves eram máquinas frágeis, meras engenhocas de arame, madeira e tecido. A aterragem era uma manobra complicada, muito mais difícil de dominar do que a decolagem. Os motores eram pouco fiáveis e a falha do motor era comum, embora não levasse necessariamente à queda, pois as aeronaves podiam planar facilmente [2]. No entanto a falha estrutural era fatal: se as asas ou as superfícies de controlo colapsassem sob a pressão de manobras abruptas ou através da acumulação de tensões, o piloto estava condenado.

A partir de 1909 houve rápida expansão de projetos de aeronaves, com aviões de sucesso evoluindo a partir da acumulação de conhecimento baseado na experiência de construir e de voar máquinas voadoras. As empresas de fabrico eram em pequena escala e empregavam engenheiros e artesãos que poderiam ter trabalhado anteriormente em qualquer atividade, desde a construção naval até ao fabrico de móveis. O processo produtivo era lento e laborioso; a produção mais mecanizada e em larga-escala desenvolveu-se apenas depois de 1911, quando foram feitos os primeiros contratos militares [2]. Por essa altura França, Alemanha e Grã-Bretanha eram os únicos países europeus que davam passos significativos no sentido de construir uma indústria de aviação. Vários progressos foram alcançados, nomeadamente a introdução de fuselagens metálicas na fábrica de Louis Bréguet.

Os maiores avanços técnicos antes da 2ª Guerra Mundial disseram respeito ao tamanho: para terem utilidade prática tanto em tempo de paz quanto na guerra os aviões tinham que ser maiores, exigindo a utilização de mais do que um motor. O projetista russo *Igor Sikorsky* (1889-1972) construiu e repetidamente voou grandes aviões de quatro motores em 1913-1914, incluindo uma viagem de ida e volta de 2600 km entre São Petersburgo e Kiev. Abriu assim caminho para o projeto de aeronaves viáveis para transporte de passageiros e de bombardeiros pesados.

A aeronáutica tornava-se rapidamente uma indústria e, um pouco mais lentamente, uma ciência [2].

1.4.6 Utilização Militar: a Primeira Guerra Mundial (1914-1918)

Os grandes avanços feitos nos anos anteriores na nova ciência da aerodinâmica começaram a influenciar seriamente o projeto de aeronaves durante a Primeira Guerra Mundial [2]. A primeira aplicação prática dos aviões foi como instrumento de guerra. O avião desenvolveu-se rapidamente como arma de guerra, e amadureceu sob o esforço de combate durante a Primeira Guerra Mundial, quando as técnicas de força aérea foram inicialmente desenvolvidas. Pela primeira vez, as aeronaves eram operadas diariamente, com tudo o que isso implica em termos de manutenção e requisitos de fiabilidade. Motores mais potentes e fuselagens robustas contribuíram para uma grande melhoria no desempenho geral. Ocorreu também uma mudança de escala: as aeronaves eram fabricadas às centenas antes da guerra e passaram a ser produzidas aos milhares. Militarmente, foram identificados os diferentes papéis que as aeronaves poderiam desempenhar e o projeto de aeronaves especializadas para atendê-los. [2]. Apesar de até então as guerras serem lutadas por marinha e exército, os aviões mostraram-se mais úteis e fiáveis e de produção muito mais barata.

1.4.7 Outros marcos tecnológicos

No rescaldo da Primeira Guerra Mundial os fabricantes de aviões lutaram para sobreviver, já que o desmantelamento das forças aéreas militares inundou o mercado com aeronaves excedentárias [2]. Apesar da debilidade da indústria da aviação, o fascínio do público pelo voo permaneceu e recordes de voo de longa distância foram batidos para destinos cada vez mais distantes. Após as rápidas melhorias de desempenho alcançadas durante a guerra, o advento de

aeronaves totalmente metálicas levou a avanços radicais em termos de velocidade e alcance de voo, enquanto a evolução de instrumentos de voo e dispositivos de navegação o tornaram cada vez mais seguro [2].

Nos anos 1930, teve lugar a revolução no projeto de aeronaves: os monoplanos superaram os biplanos de elevado arrasto; a construção totalmente metálica tornou-se a regra, beneficiando da evolução da metalurgia, especialmente das ligas leves de alumínio (o fabrico de aeronaves foi o primeiro grande aplicação encontrada para o alumínio); os motores continuaram a aumentar em fiabilidade e relação potência/peso (no final de 1930 os motores eram capazes de fornecer mais de 1000 cv); os trens de aterragem retráteis eram norma. Outras melhorias incluíram propulsores de velocidade constante, o uso de flaps foi introduzido para mudar temporariamente a forma da asa, e a segurança foi melhorada através da montagem de degeladores no bordo de ataque das asas [2].

No final da Primeira Guerra Mundial os aviões alcançavam velocidade máxima inferior a 200 km/h, à qual o ar se comporta como um fluido incompressível. Em 1930, as aeronaves de alta velocidade ultrapassaram a marca dos 650 km/h, e as limitações da propulsão aeronáutica tradicional tornaram-se evidentes: o ar que se movia sobre a parte superior da hélice aproximava-se da velocidade supersónica e desprendia-se do perfil aerodinâmico, com aumento do arrasto e perda de sustentação [1]. A razão é a aproximação à velocidade do som, começando a atmosfera a comprimir-se na frente da aeronave e criando uma onda de choque em forma de cone que retorna do nariz. Quando a onda cruza a asa, a pressão nesta sobe a um valor tal que o piloto não consegue operar os comandos de controlo. Em 1935 *Adolf Busemann* sugeriu que uma asa em forma de delta permaneceria dentro do cone da onda de choque, permitindo ao avião escapar dos efeitos de compressibilidade.

Adicionalmente, o desenvolvimento de motores de combustão maiores e mais potentes não foi suficiente para acompanhar a crescente necessidade de incremento da relação potência/peso, e a indústria de propulsão respondeu com a introdução de um tipo radicalmente diferente de instalação de energia, o motor a jato.

1.4.8 Utilização Militar: a Segunda Guerra Mundial (1939-1945)

Durante a Primeira Guerra Mundial foram inicialmente desenvolvidas e amplamente utilizadas as técnicas de força aérea. Durante Segunda Guerra Mundial as aeronaves militares tornaram-se parte integrante da guerra [2]. A aviação desempenhou um papel vital nas operações do exército, fornecendo às tropas terrestres mobilidade, mantimentos e apoio ao fogo, transportando paraquedistas, e realizando bombardeamentos estratégicos para destruir a capacidade produtiva e o ânimo do inimigo.

A produção de aviões aumentou significativamente: por exemplo a indústria dos EUA produziu cinco vezes mais aviões entre 1939 a 1945 (324750) do que o número total (50031) fabricado durante o período entre 1911 e 1938 [1].

Os principais desenvolvimentos técnicos ocorreram durante este período e uma série de impressionantes novas tecnologias foram produzidas, incluindo armas nucleares, aviões a jato, mísseis guiados, foguetes de longo alcance e uma série de sistemas eletrónicos. Em particular, a propulsão por turbojato marcou um ponto de viragem na história da aviação e representou uma mudança fundamental na tecnologia aeronáutica [1].

1.4.9 Marcos tecnológicos no pós-guerra

Depois da Segunda Guerra Mundial o novo e imensamente poderoso motor a jato revolucionou tanto a aviação militar como a aviação comercial, iniciando uma nova era de aeronáutica de alta

velocidade [1]. Em 1950 as viagens aéreas eram comuns, e no final da década tinham substituído o comboio e o navio a vapor como meio de transporte preferido [2].

A principal força motriz por trás do desenvolvimento tecnológico da aviação nos 40 anos após o fim da Segunda Guerra Mundial foi o confronto da Guerra Fria entre os aliados ocidentais e o bloco comunista [2]. O resultado foi o notável progresso no projeto de aeronaves, motores a jato, aviônica e armamento, desenvolvidos com o objetivo de assegurar a supremacia aérea em qualquer conflito futuro [2].

Em 1947, *Chuck Yeager* tornou-se o primeiro ser humano a bater oficialmente a barreira do som (14 de outubro de 1947) voando o avião experimental *Bell X-1* a *Mach 1*, a uma altitude de 45000 pés (13700 m). *Albert Scott Crossfield* alcançou *Mach 2* voando o *Douglas D-558-II Skyrocket* (20 de novembro de 1953), e em setembro de 1956 o *Bell X-2* voou a uma velocidade 3 vezes superior à do som [1]. A esta velocidade o principal problema é o aquecimento aerodinâmico, uma vez que a fricção da skin eleva a temperatura para valores aos quais as ligas leves de referência perdem resistência mecânica e à fluência (§ Módulo 2). Para ultrapassar este problema, o *Bell X-2* foi construído em superliga de níquel K-Monel e aço inoxidável. Em 1959 teve lugar o primeiro voo do *X-15* (construído em superliga de níquel Inconel-X), projetado para explorar o voo a velocidade hipersônica (ou seja, acima de *Mach 5*) e para atingir altitude suborbital. Nos 9 anos seguintes estas aeronaves alcançaram velocidades até *Mach 6.72* e altitude até 354200 pés (108000 m); oito pilotos alcançaram as suas asas de astronautas pilotando o *X 15*.

A década de 1954-1964 testemunhou de fato a mudança mais dramática na história da indústria aeronáutica, com a transição da aviação para o âmbito aeroespacial e marcando os anos mais intensos para o programa lunar Apollo e para o desenvolvimento de novas famílias de mísseis nucleares teleguiados [1]. Por essa altura os aviões estavam já incorporados em sistemas tecnológicos de maior dimensão: novas ferramentas e técnicas foram desenvolvidas para gerir projetos aeroespaciais complexos, orientando o curso da pesquisa científica, o avanço de uma ampla gama de tecnologias criticamente importantes e estabelecendo as bases para novas indústrias que moldariam o futuro do mundo [1].

1.4.10 Marcos tecnológicos nos anos 1980 e 1990

No último quartel do século XX as grandes aeronaves a jato tornaram as viagens aéreas comuns e acessíveis [2]. Voar tornou-se natural para centenas de milhões de pessoas e está tão profundamente entrelaçado no tecido da sociedade que é impossível imaginar um mundo sem aviação [2].

Durante esses anos o advento da eletrônica digital produziu grandes avanços na instrumentação de voo e nos sistemas "*fly-by-wire*". O século XX assistiu à introdução do uso em larga escala de drones sem piloto para uso militar, civil e de lazer, e o voo de aeronaves inerentemente instáveis (como asas voadoras) tornou-se possíveis através de controlo digital.

1.5 O SÉCULO XXI

Em última análise, a maior ameaça para a expansão futura da aviação está provavelmente na crescente sensibilidade aos danos ambientais causados pelas aeronaves. [2]. Consequentemente, no final do século XX a capacidade para voar de forma mais limpa, mais silenciosa e com maior eficiência de combustível começou a equilibrar a necessidade de voar mais alto e mais rápido [1]. O exemplo mais bem sucedido dessa tendência é provavelmente o protótipo Helios construído pela NASA em 1999 (Figura 6, Table 1.2). Foi desenvolvido como parte de uma série evolucionária de veículos aéreos não tripulados movidos a energia solar e

células de combustível. Foi construído com o objetivo de desenvolver tecnologias que permitirão que aeronaves de alta altitude com pilotagem remota venham a servir como satélites atmosféricos e como plataformas de comunicação nos limites da atmosfera terrestre. Em 13 de agosto de 2001 o Helios alcançou uma altitude de 96863 pés (29524 m), um recorde mundial para voo horizontal sustentado por uma aeronave alada e passou mais de 40 minutos acima de 96000 pés (29000 m) [8].



Figura 6. O gigante protótipo solar-elétrico Helios no seu voo de teste a energia solar [8].

Table 2. Especificações técnicas do protótipo Helios [8]

Propulsão	14 motores elétricos de corrente contínua, cada um com 1,5 kW, impulsionando hélices de fluxo laminar de duas pás
Envergadura	75 m
Comprimento	3,7 m
Peso	600 kg
Velocidade máxima	até 44 km/h a baixa altitude, até 179 km/h a elevada altitude
Altitude	cruzeiro 30 km máxima 60 km
Materiais	Compósito de fibra de carbono, Kevlar®, bordo de ataque em Styrofoam®, asa coberta por filme plástico transparente

Na mesma linha, o suíço Solar Impulse 2 é uma aeronave movida a hélice com mais de 17000 células solares na superfície superior, alimentando quatro motores elétricos. É construído em compósito de fibra de carbono e pesa 2300 kg, pouco mais que um carro grande; no entanto, a sua envergadura (71,9 m) é quase a mesma que a do A380 [2]. De março de 2015 a julho de 2016 completou a primeira circunavegação aérea do globo a energia solar, provando a adequação das tecnologias limpas como base para uma aviação ambientalmente sustentável [2].

Outra vertente de desenvolvimento tem sido a operação remota de voo não tripulado. Um exemplo bem sucedido é a aeronave Global Hawk. Foi projetada como aeronave de vigilância (até 100000 km² de terreno por dia, aproximadamente à área da Islândia), fornecendo uma ampla visão geral e vigilância sistemática através de um radar de alta resolução equipado com sensores eletro-óticos/infravermelhos de longo alcance, e capaz de longos tempos de voo sobre áreas-alvo [2]. É usado desde 1998 pela Força Aérea dos Estados Unidos e pela NATO, mas em 2007, duas unidades foram adquiridas pela NASA para pesquisa aérea da superfície terrestre. A sua capacidade para voar autonomamente longas distâncias, permanecer no ar por longos períodos de tempo e transportar cargas elevadas trouxe uma nova capacidade à comunidade científica para medição, monitorização e observação de locais remotos do planeta, inviável ou pouco prática com satélites, aeronaves pilotadas, ou com a maioria das outras aeronaves de controlo remoto disponíveis [9]

No início do século XX, os pioneiros acharam impossível prever o futuro da tecnologia que criaram: “nenhum dirigível jamais voará de Nova York para Paris”, “nenhum motor pode funcionar durante quatro dias sem parar”, “o dirigível sempre será um mensageiro especial, nunca um transportador de carga” foram previsões de *Wilbur Wright* em 1909 [1]. O seu irmão *Orville* não acreditava que “o avião alguma vez tomará o lugar de comboios e navios a vapor no transporte de passageiros”. A tecnologia de voo era então recente e imatura, impossibilitando

prever o futuro. Desde então, melhorias simples resultaram em grandes avanços de desempenho, e a mudança foi extraordinária e extremamente rápida. Do mesmo modo, o futuro é igualmente difícil de prever a partir do estado atual da aeronáutica. No entanto, parece haver poucas dúvidas de que o investimento continuará a alimentar novas tecnologias que irão transformar a maneira como voamos. Seja qual for o futuro, é improvável que a humanidade perca o sentido de maravilhamento pela sua capacidade de voar.

2 MATERIAIS

2.1 INTRODUÇÃO

Os materiais são o suporte estrutural e/ou funcional de todos os objetos, estruturas e sistemas usados em toda e qualquer atividade da vida humana.

Os materiais acompanham a humanidade desde o início de sua existência, pelo que a história dos materiais é um reflexo da história da humanidade [10]. Entre os primeiros materiais utilizados pelos seres humanos estavam pedra, madeira, osso, fibra, pele e pelo animal, penas, conchas e argila, todos disponíveis na natureza. Esses materiais eram utilizados para fabrico de ferramentas, armas, utensílios, roupa, abrigo e para autoexpressão. Estas aplicações são exatamente as mesmas que nas sociedades contemporâneas, embora os materiais disponíveis sejam claramente mais abundantes, complexos e sofisticados. O aumento da utilização de novos materiais e o desenvolvimento de materiais cada vez mais sofisticados foi paralelo ao desenvolvimento civilizacional, ou seja, civilizações avançadas inventaram e usaram materiais mais elaborados, que lhes conferiam poder em relação aos seus vizinhos. Isso ainda é verdade nos dias atuais.

Os materiais são tão importantes que os historiadores nomearam as idades da História a partir do material predominantemente usado: Idade da Pedra, Calcolítico, Idade do Bronze, Idade do Ferro [10]. Além disso, os nomes de alguns metais entraram no uso linguístico introduzindo uma distinção metafórica. Por exemplo, medalhas atribuídas por desempenho excepcional são atribuídas em ouro, prata e bronze; os aniversários de casamento são também classificados usando ouro e prata. Entre o final da Segunda Guerra Mundial e o final dos anos 1990 a era histórica denominou-se Idade do Silício [10], o material base para o fabrico dos dispositivos elétricos, eletrônicos e microeletrônicos que permeiam em grande extensão a vida quotidiana. No entanto, desde então, outra categoria de materiais tem alcançado maior impacto sobre a vida dos seres humanos: os nanomateriais. Os nanomateriais são materiais com pelo menos uma dimensão entre 1-100 nm. (1 nm corresponde a 10^{-9} m, a mesma relação de tamanhos que existe entre uma formiga e um estádio de futebol). À nanoescala os materiais possuem propriedades óticas, eletrônicas e mecânicas únicas e têm alavancando avanços na investigação e síntese de materiais e microfabrico.

Os materiais podem ser classificados de várias maneiras, nomeadamente através da sua origem, natural ou sintética:

Materiais naturais. Os materiais naturais vêm diretamente da natureza e existem sem ação humana. São extraídos da natureza com poucas alterações químicas, e podem ser processados e enformados para obtenção de produtos utilizáveis. Podem ser de origem vegetal (por exemplo madeira, bambu, cortiça e fibras naturais como o algodão e o linho), animal (seda e lã por exemplo) ou mineral (argila, rochas, pigmentos, petróleo, carvão). Os metais nativos também estão incluídos nesta classificação, nomeadamente ouro e platina (mas também chumbo, mercúrio, prata, irídio, ósmio, paládio, ródio e ruténio).

Materiais sintéticos. Os materiais sintéticos são fabricados pelos seres humanos através de síntese química, ou através de processamento térmico, físico-químico ou mecanoquímico. Resultam de extensa investigação feita por cientistas e engenheiros para melhorar as matérias-primas e torná-las melhores e mais fiáveis para a aplicação a que se destinam.

Outra classificação possível baseia-se nas propriedades principais ou mais representativas do material considerando a aplicação prevista, estruturais ou funcionais.

Materiais estruturais. Os materiais estruturais usam-se principalmente por causa das suas propriedades mecânicas e têm como objetivo suportar cargas e fornecer apoio para um determinado sistema.

Materiais funcionais. Os materiais funcionais são selecionados com base em propriedades que não propriedades mecânicas. Desempenham um papel cada vez mais importante na sociedade contemporânea, formando a base para uma ampla gama de tecnologias que exigem desempenho eletrônico, magnético, químico, térmico ou ótico. Exemplos são computação, comunicação, armazenamento e apresentação de informação (ou seja, todo o setor de TI), geração e armazenamento de energia, e mobilidade.

Qualquer que seja a sua função ou origem, todos os materiais podem ser classificados em quatro famílias: metais, cerâmicos e vidros, plásticos, e compósitos (Figura 7).

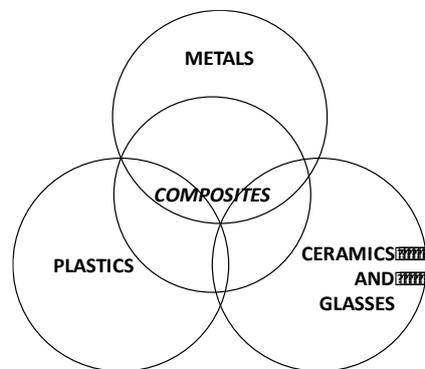


Figura 7. As quatro famílias de materiais: metais, cerâmicos e vidros, plásticos e compósitos.

Metais. A maioria dos metais é encontrada na natureza na forma de óxidos metálicos (minérios). Esses óxidos metálicos são refinados para obtenção de metais puros, sendo o metal extraído do seu óxido através do uso de um agente redutor [11]. Depois de produzido o metal puro, ele pode ser ligado e/ou processado na forma desejada, através de operações de enformação (Figura 8).
Metals.



Figura 8. Do minério de cobre ao fio de cobre: (a) a calcopirite (CuFeS_2 , com 34.5 %-Cu) é um dos vários minérios de cobre existentes na natureza; (b) pode ser refinado para obtenção de cobre metálico; (c) e o metal é depois enformado para obtenção da forma final desejada.

Os metais são materiais constituídos elementos metálicos da Tabela Periódica (Figura 9), unidos por ligação metálica (forte). Na ligação metálica, os elétrons de valência estão apenas fracamente ligados ao núcleo correspondente e movem-se livremente entre todos os núcleos atômicos, denominando-se elétrons de condução. Estas características da ligação metálica determinam a maioria das propriedades dos materiais metálicos. No estado sólido os metais são

tipicamente duros, opacos, brilhantes e possuem boa condutividade elétrica e térmica. São geralmente maleáveis (isto é, podem ser permanentemente deformados sem romperem ou fissurarem), fusíveis e dúcteis (capazes de serem puxados para em forma de fio fino sem fraturarem). No entanto, o seu valor de densidade é geralmente muito alto, embora varie amplamente, dependendo do metal (entre $0,53 \text{ g/cm}^3$ para o lítio e $22,58 \text{ g/cm}^3$ para o ósmio) (Tabela 2.1). Outra limitação de grande parte dos metais é a elevada tendência para sofrerem corrosão em diversos ambientes químicos.

Group → 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18
 ↓ Period

1 1 H 2 He
 2 3 Li 4 Be 5 B 6 C 7 N 8 O 9 F 10 Ne
 3 11 Na 12 Mg 13 Al 14 Si 15 P 16 S 17 Cl 18 Ar
 4 19 K 20 Ca 21 Sc 22 Ti 23 V 24 Cr 25 Mn 26 Fe 27 Co 28 Ni 29 Cu 30 Zn 31 Ga 32 Ge 33 As 34 Se 35 Br 36 Kr
 5 37 Rb 38 Sr 39 Y 40 Zr 41 Nb 42 Mo 43 Tc 44 Ru 45 Rh 46 Pd 47 Ag 48 Cd 49 In 50 Sn 51 Sb 52 Te 53 I 54 Xe
 6 55 Cs 56 Ba 57 La 58 Ce 59 Pr 60 Nd 61 Pm 62 Sm 63 Eu 64 Gd 65 Tb 66 Dy 67 Ho 68 Er 69 Tm 70 Yb 71 Lu
 7 87 Fr 88 Ra 89 Ac 90 Th 91 Pa 92 U 93 Np 94 Pu 95 Am 96 Cm 97 Bk 98 Cf 99 Es 100 Fm 101 Md 102 No 103 Lr

Lantanídeos
 Actínídeos

Figura 9. Tabela Periódica dos Elementos: 91 dos 118 elementos são metais (assinalados a azul).

LIGA = METAL PURO + ELEMENTOS DE LIGA

Table 3. Densidade de alguns metais puros e respetiva densidade relativa vs alumínio (a cinzento destacam-se os mais importantes em construção aeronáutica).

Elemento	Símbolo químico	Densidade (g/cm^3)	Densidade relativamente a Al
Lítio	Li	0,53	0,20
Magnésio	Mg	1,74	0,64
Alumínio	Al	2,70	1,00
Titânio	Ti	4,51	1,67
Zinco	Zn	7,13	2,64
Estanho	Sn	7,28	2,70
Ferro	Fe	7,87	2,92
Níquel	Ni	8,91	3,30
Cobre	Cu	8,93	3,31
Prata	Ag	10,50	3,89
Estanho	Pb	11,34	4,20
Ouro	Au	19,28	7,15
Ósmio	Os	22,58	8,37

Table 4. Alguns exemplos de ligas metálicas usadas em aplicações estruturais e funcionais comuns.

Metal	Objetivo principal
aços	estrutural
ferros fundidos	
ferros forjados	
cobre	funcional (condutividade elétrica)
bronzes (ligas Cu-Sn)	funcional (baixo atrito, ressonância, resistência à corrosão)
latões (ligas Cu-Zn)	funcional (resistência à fluência)
Ligas de níquel	
Ligas de ouro	funcional (joalheria)
folha de Flandres (ligas Sn-Pb)	funcional (latas de comida em conserva)

Uma mistura homogénea de elementos metálicos ou de um elementos metálicos com não-metais em pequena quantidade denomina-se liga. Tal como os metais puros, as ligas também são definidas por ligações metálicas. Estas misturas sintetizam-se com o objetivo de fornecer ou melhorar características ou propriedades específicas: em alguns casos, uma combinação de um metal com outros elementos pode reduzir o custo total do material enquanto preserva propriedades importantes; noutros casos, uma combinação de composições permite o desenvolvimento de metais com uma gama mais ampla de propriedades do que a obtida somente com metais puros, como resistência à corrosão ou resistência mecânica [2]. Exemplos de ligas são os aços (ferro + carbono), os latões (cobre + zinco), o duralumínio (alumínio + cobre),

os bronzes (cobre + estanho) e amálgamas (mercúrio + prata, por exemplo). Os metais e ligas metálicas são utilizadas em aplicações fins estruturais e funcionais (Table 4).

Cerâmicos e vidros. Quimicamente os cerâmicos e os vidros são compostos formados por pelo menos dois tipos de elementos da Tabela Periódica: um metal e um não-metal (a amarelo na Figura 9), unidos por ligação iônica e/ou covalente. Estas ligações são fortes, mas ao contrário da ligação metálica não existem elétrons de condução, determinando propriedades como a baixa condutividade térmica e elétrica e a elevada inércia química dos cerâmicos. O oxigênio, o carbono e o azoto são os não-metais presentes nos cerâmicos mais relevantes em engenharia, respetivamente óxidos (por exemplo óxido de alumínio, Al_2O_3), carbonetos (por exemplo carboneto de silício, SiC) e nitretos (por exemplo nitreto de titânio, TiN).

A utilização de materiais cerâmicos é provavelmente tão antiga quanto a própria humanidade, primeiro com o uso de minérios, rocha, argila e minerais, e posteriormente com a utilização de argila cozida. Isso explica porque é que os historiadores não designaram especificamente uma Idade da Cerâmica: enquanto a pedra, o cobre, o bronze e o ferro podem ser associados a períodos de tempo razoavelmente bem definidos durante os quais esses materiais foram usados predominantemente, materiais cerâmicos têm sido usados ativamente e continuamente desde há muitos milénios até ao presente [10]. No entanto, duas revoluções na civilização humana estão associadas aos materiais cerâmicos [12]. A primeira corresponde à descoberta há cerca de 20000 anos de que o fogo transforma irreversivelmente a argila num material durável e impermeável. Esta possibilidade permitiu a transição do nomadismo para o estabelecimento de comunidades sedentárias agrárias, e conduziu a uma enorme melhoria na qualidade e duração da vida das sociedades. Outra revolução ocorreu na década de 1950 com o uso inovador de cerâmicos especialmente projetados para a reparação e reconstrução de partes doentes ou danificadas das partes duras (ossos e dentes) do corpo humano - os cerâmicos usados para este fim denominam-se biocerâmicos.

As propriedades dos cerâmicos são muito variáveis, mas estes materiais tendem a ser resistentes e duros, embora muito frágeis [11]. Como resultado, as suas principais aplicações continuam a ser a cerâmica tradicional, vidros, abrasivos, tijolos e cimentos (Figura 10 a)). Há no entanto exceções, e cerâmicos de alto desempenho (Figura 10 b)) são utilizados por exemplo em coletes à prova de balas, telhas de revestimento de veículos espaciais e como supercondutores [11].



Figura 10. Alguns exemplos de aplicação de materiais cerâmicos. (a) Cerâmicos tradicionais: (no sentido horário) vidro de embalagem, vidro plano, cimento, porcelana, tijolo, abrasivos. (b) Cerâmicos técnicos: (no sentido horário) fibras de reforço, isoladores elétricos, revestimento biocerâmico em prótese da anca, material de laboratório, revestimento duro em ferramenta de corte, telhas em armadura cerâmica.

Polímeros. Os polímeros são moléculas de grande dimensão (macromoléculas), obtidos através de uma reação de polimerização entre um grande número de moléculas orgânicas. As cadeias resultantes têm elevada massa molecular e ligação covalente entre átomos de carbono, conduzindo a propriedades físicas únicas incluindo tenacidade, viscoelasticidade e tendência para formar estruturas amorfas e semicristalinas em vez de cristais. Na enorme maioria dos polímeros o carbono é o principal átomo da cadeia, ligado a hidrogénio, oxigénio, azoto, cloro e/ou flúor na maioria dos casos [11]. A interação entre cadeias vizinhas ocorre através de forças de van der Waals (fracas), pelo que os polímeros apresentam tipicamente baixa resistência mecânica e baixa temperatura de fusão [11].

Os polímeros vão desde plásticos sintéticos familiares como o PVC, até biopolímeros naturais como o DNA e as proteínas. Quer os polímeros sintéticos quer os naturais desempenham papéis essenciais e onipresentes na vida quotidiana. Muitos polímeros são flexíveis e de baixa densidade, o que os torna ideais para muitas aplicações em que elevada resistência não é necessária. No entanto, como existem muitos tipos de polímeros, e as suas propriedades variam muito [11], desde o polietileno com baixa resistência e elevada ductilidade (é o polímero sintético mais simples, usado, por exemplo, em sacos plásticos baratos, Figura 11 a), até ao Kevlar® (usado como fibras balísticas em coletes à prova de bala, Figura 11 b).



Figura 11. Diversidade de polímeros, desde (a) aplicação de polietileno em sacos de compras, até (b) colete de Kevlar® após o disparo. As cadeias moleculares correspondentes são mostradas na parte inferior de cada imagem.

Compósitos. Compósitos são materiais obtidos através da mistura de dois ou mais constituintes com propriedades significativamente diferentes, que quando combinados produzem um material com características diferentes dos componentes individuais. Esses componentes individuais são insolúveis um no outro e permanecem separados e distintos dentro da estrutura final, diferenciando-se assim de misturas e soluções. Os compósitos podem ser de origem natural (madeira, por exemplo) ou sintética. Os compósitos de origem natural são raramente utilizados em aplicações de engenharia, devido à falta de reprodutibilidade e disponibilidade incerta que lhes estão associadas.

COMPÓSITO = MATRIZ + FASE DE REFORÇO

Os materiais compósitos são compostos por duas fases, a matriz e a fase de reforço. A matriz é o material que protege, orienta e transfere a carga imposta para o material de reforço. Dependendo da geometria do reforço, os compósitos sintéticos são classificados em três classes principais (Figura 12): compósitos reforçados com partículas, reforçados com fibras e laminares. Os compósitos reforçados com partículas contêm um grande número de partículas (por exemplo a mistura de cimento, areia e cascalho usada no betão), que tendem a melhorar propriedades

como tenacidade ou resistência ao desgaste) (Figura 12a) [11]. Em compósitos reforçados com fibras (Figura 12 b) e c)) fibras resistentes e rígidas, são colocadas no interior de uma matriz dura e dúctil, resultando num material com elevada relação resistência/densidade, rigidez/densidade e elevada resistência à fadiga. Materiais comuns usadas para reforço incluem fibras de carbono, fibras de vidro e fibras de Kevlar®. Compósitos estruturais consistem em camadas alternadas de diferentes materiais unidos entre si para formar laminados (Figura 12 d) ou geometrias de empilhamento mais complexas.

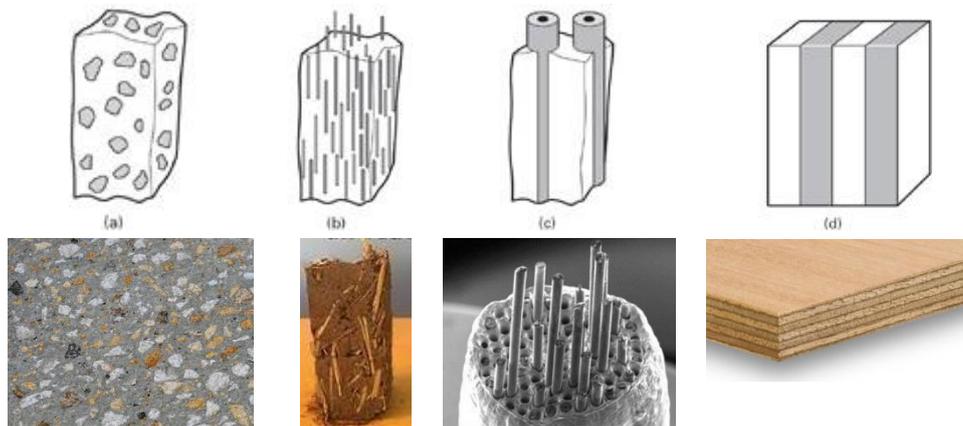


Figura 12. Classificação de compósitos sintéticos, mostrando uma representação esquemática [4] e um exemplo de aplicação: (a) compósito reforçado com partículas (por exemplo, betão); (b) compósito reforçado com fibras curtas (por exemplo, tijolos de adobe); (c) compósito reforçado com fibras contínuas (por exemplo, matriz de cobre reforçada com fibra de carbono usada em pás de turbina de avião para aumentar a eficiência do motor); e (d) compósito laminar (por exemplo, contraplacado).

2.2 REQUISITOS DE MATERIAIS PARA AERONÁUTICA

A ciência e engenharia de materiais são muito importantes para a engenharia aeroespacial. A sua prática é definida por normas internacionais que especificam todos os materiais e métodos para o seu processamento que estão envolvidos na construção de aeronaves. O projeto de aeronaves requer materiais que permitam produzir estruturas económicas, duráveis e leves, e que sejam tolerantes a dano numa gama de temperaturas que variam entre sub-zero a elevadas [14]. O estabelecimento de metas de desempenho é fundamental para a segurança de uma aeronave, mas também está (indiretamente) relacionado com aspetos económicos da aviação comercial. Em relação ao desempenho mecânico, as características mais importantes na seleção de materiais para uma aeronave são:

- **Elevada resistência mecânica.** A resistência mecânica é a capacidade do material para suportar uma carga aplicada sem fratura ou deformação irreversível (denominada deformação plástica). As cargas aplicadas podem ser axiais (de tração ou compressivas) ou de corte e induzir tensões que causam deformação do material de várias maneiras, incluindo a fratura completa da peça.
- **Elevada rigidez.** A rigidez é uma medida da extensão a que um sólido é capaz de resistir a deflexão em resposta a uma força aplicada. O conceito complementar é a flexibilidade: quanto mais flexível for um objeto, menos rígido será. A deflexão depende não apenas das propriedades físicas do material estrutural, mas também da espessura e forma.

- **Elevada tenacidade à fratura.** A tenacidade é a capacidade de um material para absorver energia aplicada e deformar-se plasticamente sem fraturar.
- **Elevada resistência à fadiga.** A fadiga é a diminuição de resistência de um material causada pela aplicação de forças oscilantes no tempo. É um dano estrutural localizado, iniciando-se com a formação de fissuras microscópicas que se propagam à medida que o material é submetido a cargas e descargas repetidas, até que à fratura da estrutura. A forma da estrutura afeta significativamente a vida de fadiga: furos quadrados ou cantos aguçados conduzem a tensões locais elevadas onde podem iniciar-se fissuras por fadiga; furos redondos e transições suaves aumentam a resistência da estrutura à fadiga. (Quebrar um clip de papel é um exemplo de fadiga que a maioria das pessoas identifica: enquanto um clip não pode ser partido puxando pelas suas extremidades, a aplicação de uma força alternada em cada ponta conduz facilmente a esse resultado).

Outras propriedades além das mecânicas são também extremamente importantes em construção aeronáutica:

- **Baixo valor de densidade.** A densidade é a propriedade dos materiais que se relaciona com o peso da estrutura aeronáutica (Figura 13). A densidade (ρ) de uma substância é a sua massa (m) por unidade de volume (V) (1). Materiais diferentes têm tipicamente densidades diferentes. A densidade não depende do tamanho ou forma da peça, mas varia com a temperatura, pressão e composição.

$$\rho = \frac{m}{V} \text{ (kg/m}^3 \text{ in SI units)} \quad (1)$$

A densidade é particularmente importante em construção aeronáutica porque a minimização do peso da estrutura resulta indiretamente em arrasto (Módulo 3), conduzindo a aumento da eficiência do avião. Para uma dada carga, uma estrutura mais leve gera menor arrasto. A minimização do peso pode ser alcançada através da configuração da estrutura da aeronave, seleção de materiais e métodos de construção. Para obter um maior alcance de voo, é necessária uma maior proporção de combustível relativamente ao peso máximo na decolagem, afetando adversamente a eficiência. Ou seja, o custo do combustível de aviação e a redução de emissões são reduzidos em aeronaves mais leves.



Figura 13. Ilustração da relação entre massa e volume dos objetos.

- **Elevada resistência à corrosão.** A corrosão é um processo natural, que converte um metal numa forma quimicamente mais estável, como seu óxido, hidróxido ou sulfeto. Corresponde à destruição gradual dos materiais por reação eletroquímica com o ambiente que o rodeia. A formação de óxidos de ferro (ferrugem), é um exemplo bem conhecido de corrosão eletroquímica. Muitas ligas corroem simplesmente por exposição à humidade do ar, mas o processo pode ser fortemente afetado pela exposição a substâncias específicas (como chuva ácida ou gases de combustão). A

corrosão pode estender-se mais ou menos uniformemente por uma área ampla corroendo toda a superfície de maneira mais ou menos uniforme, mas alguns mecanismos de corrosão são menos visíveis e menos previsíveis e o processo pode concentrar-se localmente, formando fissuras ou picadas.

- **Elevada resistência a variações de temperatura entre subzero e elevadas.** A taxa variação padrão de temperatura é de 2 °C por cada 305 m (1000 pés) de altitude. Assim, à altitude cruzeiro típica de 11000 m, a temperatura no exterior do avião está abaixo de -51 °C. Por outro lado, vários locais na Terra podem atingir temperaturas do ar bem acima de 50 °C (por exemplo, o Vale da Morte nos EUA, Líbia, Etiópia, Sudão, Irã, Israel, Mali e Tunísia), afetando as etapas de táxi, decolagem e aterragem. Os materiais usados na aeronave devem não apenas resistir a essa faixa de temperatura, mas também ser dimensionalmente compatíveis: se uma peça é colocada onde não pode expandir livremente, uma enorme força é exercida sobre as regiões vizinhas devido à expansão térmica, eventualmente levando a fissuração. O projeto deve assim levar em consideração que os materiais que compõe uma estrutura aeronáutica devem apresentar expansão dimensional semelhante com aumento de temperatura e contração similar com diminuição de temperatura.

2.3 MATERIAIS PARA AERONÁUTICA

2.3.1 Madeira

O avião foi a primeira grande tecnologia em que o peso é preocupação primordial, sendo crucial para o funcionamento básico das tecnologias associadas [15]. Por causa da natureza única de uma aeronave (opera inteiramente contra a força da gravidade), as relações potência/peso e resistência/peso são os principais parâmetros de projeto. No início da história da aviação a madeira era o único material disponível viável para construção de uma máquina voadora com estrutura suficientemente leve e simultaneamente resistente (Figura 14) para suportar as forças aplicadas durante o voo [15]. Outros fatores que levaram à utilização intensiva de madeira foram a facilidade de processamento e de reparação e o seu baixo custo. A Figura 15 resume a história da madeira como material de construção de aeronaves. A sua utilização aumentou constantemente a partir de 1903 e a partir de 1914 a procura aumentou bruscamente por causa do início da 1ª Guerra Mundial; um segundo grande aumento foi provocado pela introdução dos aviões como meio de transporte [16]. Neste período o sucesso da madeira como material aeronáutico beneficiou do lento desenvolvimento de ligas leves de elevada resistência e de ligas estruturais com elevada resistência à corrosão [15]. Quando as ligas de alumínio se tornaram mais prontamente disponíveis a preços razoáveis, a produção de aviões metálicos aumentou, e por volta de 1935 a produção de aviões de madeira reduziu-se significativamente (Figura 15) [16]. Na segunda metade da década de 1930 os aviões de madeira tinham sido suplantados por robustos monoplanos metálicos, uma vez que os fabricantes de aeronaves foram capazes de tirar vantagem de metais leves como a principal matéria-prima de construção e das novas fábricas a energia elétrica com maior capacidade de produção [15]. Um último incremento na utilização de madeira em aeronáutica foi causado pela 2ª Guerra Mundial, já que todo o metal era necessário para o fabrico de armas [16]. Depois da guerra apenas pequenos aviões e planadores eram construídos em madeira, diminuindo regularmente o consumo até aos anos 1970 em que também estes sectores substituíram a madeira por metais [16]. Desde então, a madeira é apenas em pequenos nichos de mercado, por exemplo o acabamento do interior de

atos privados, mas não em peças estruturais [16]. Apenas um número limitado de aeronaves em madeira é produzido hoje em dia, e principalmente pelos próprios proprietários e para fins recreativos e/ou educativos. No entanto, muitas aeronaves nas quais a madeira é o principal material estrutural ainda existem e operam, incluindo algumas da década de 1930.



Figura 14. Estrutura de asa *spar-and-rib* típica da primeira geração de aviões de madeira.

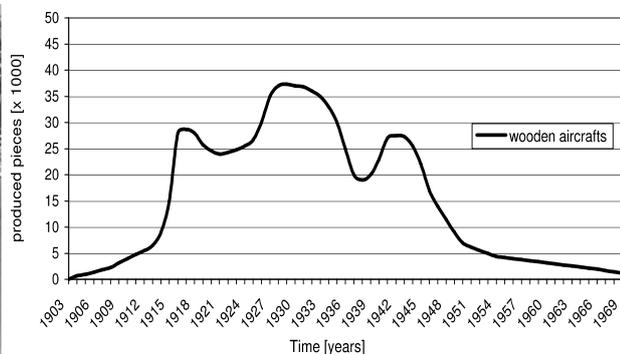


Figura 15. Desenvolvimento da construção aeronáutica em madeira até 1970 [16]

2.3.2 Alumínio

O alumínio é o elemento metálico mais comum no planeta Terra. É habitualmente ligado com pequenas quantidades de magnésio, cobre, lítio, silício, estanho e/ou zinco (

Table 5. Nomenclatura de ligas de alumínio, adaptado [11].

Designação*		Principal elemento de liga	Objetivo da adição do principal elemento de liga
Ligas de fundição	Ligas forjadas		
1xx.x	1xxx	Al > 99 %	
2xx.x	2xxx	Cu	Resistência e maquinabilidade
3xx.x	3xxx	Mn	Resistência à corrosão e maquinabilidade
4xx.x	4xxx	Si ou Si+Mg	Abaixamento do ponto de fusão
5xx.x	5xxx	Mg	Dureza e Resistência à corrosão
6xx.x	6xxx	Mg+Si	Enformabilidade e capacidade para ser tratado termicamente
7xx.x	7xxx	Mg+Zn	Resistência à corrosão sob tensão
8xx.x	8xxx	Li, Sn, B ou Zr	

*Ligas forjadas são representadas por número de quatro algarismos, onde o primeiro representa o elemento de liga principal, o segundo representa modificações, e o terceiro e quarto representam a percentagem decimal da concentração de alumínio. Ligas de fundição distinguem pelo ponto decimal entre o terceiro e o quarto algarismos.

), e pode ser enformado por deformação plástica (ligas forjadas) ou por fusão e vazamento (ligas de fundição). Em construção aeronáutica utilizam-se quase exclusivamente ligas forjadas.

As ligas de alumínio têm densidade em torno de $2,70 \text{ g/cm}^3$, que é aproximadamente um terço da dos aços. Isso resulta em excepcional valor da relação entre a resistência mecânica e o peso da estrutura, tornando-as amplamente utilizadas em aplicações aeronáuticas [11]. Ao usar ligas de alumínio, a skin da aeronave pode ficar mais espessa (para ajudar a reduzir a deflexão e a fadiga) sem adicionar tanto peso como se fosse feita de aço. Além disso, as ligas de alumínio não corroem tão facilmente quanto o aço. No entanto, a temperatura de fusão do alumínio é de $660 \text{ }^\circ\text{C}$, limitando a temperatura máxima de serviço por perda de resistência mecânica. Em aviões que voam acima de Mach 2 a temperatura da superfície alcançada por dissipação de calor

desenvolvido no atrito com a atmosfera aumenta impede a utilização de ligas de alumínio na skin. O motor dos irmãos Wright (Figura 16 a and Figura 16 b) para o Wright Flyer I consistia em quatro cilindros horizontais em linha encaixados num cárter de alumínio fundido que se prolongava para formar uma camisa de arrefecimento em redor dos cilindros. Este componente marcou a primeira vez que este material inovador foi usado na construção de aeronaves.

As ligas de alumínio de elevada resistência datam da descoberta acidental do fenómeno de endurecimento por precipitação por Alfred Wilm (Figura 16 c) em 1906 (Berlim) [14]. O seu trabalho levou ao desenvolvimento da liga forjada conhecida como Duraluminium (Al.3.5Cu-0.5Mg-0.5Mn), que foi rapidamente adotada na Alemanha para construir seções estruturais dos dirigíveis zeppelin (Figura 16 d) e para a aeronave Junkers F13, que voou pela primeira vez em 1919 [14]. Desde então, as ligas de alumínio forjadas tornaram-se essenciais no desenvolvimento de projetos de aeronaves e continuam a ser um material de construção essencial para todos os tipos de aeronaves [14].

Table 5. Nomenclatura de ligas de alumínio, adaptado [11].

Designação*		Principal elemento de liga	Objetivo da adição do principal elemento de liga
Ligas de fundição	Ligas forjadas		
1xx.x	1xxx	Al > 99 %	
2xx.x	2xxx	Cu	Resistência e maquinabilidade
3xx.x	3xxx	Mn	Resistência à corrosão e maquinabilidade
4xx.x	4xxx	Si ou Si+Mg	Abaixamento do ponto de fusão
5xx.x	5xxx	Mg	Dureza e Resistência à corrosão
6xx.x	6xxx	Mg+Si	Enformabilidade e capacidade para ser tratado termicamente
7xx.x	7xxx	Mg+Zn	Resistência à corrosão sob tensão
8xx.x	8xxx	Li, Sn, B ou Zr	

*Ligas forjadas são representadas por número de quatro algarismos, onde o primeiro representa o elemento de liga principal, o segundo representa modificações, e o terceiro e quarto representam a percentagem decimal da concentração de alumínio. Ligas de fundição distinguem pelo ponto decimal entre o terceiro e o quarto algarismos.

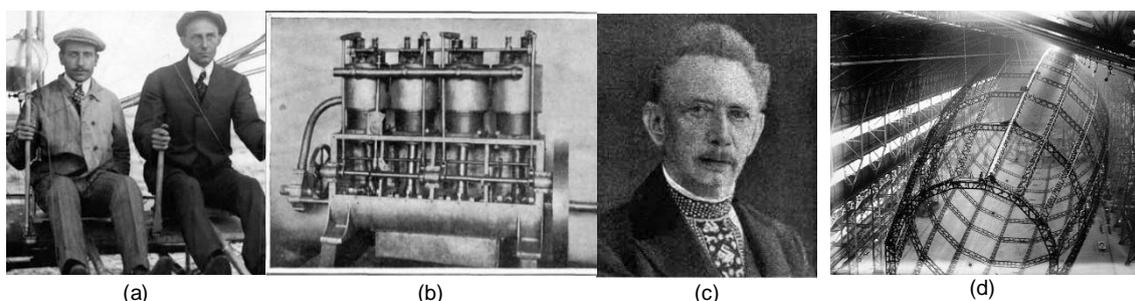


Figura 16. Os irmãos Wright (a) compreenderam a importância de minimizar o peso das aeronaves, utilizando uma liga de alumínio para fabricar o motor do Wright Flyer I (b). As ligas de alumínio de elevada resistência foram primeiro desenvolvidas pelo metalurgista alemão Alfred Wilm (c), e prontamente adotadas para a construção de seções estruturais dos zeplins (d).

Várias outras ligas são usadas na construção de aeronaves, além de ligas de alumínio:

Aços. Os aços são os metais mais presentes e versáteis na sociedade contemporânea [11]. Embora possam ser até quatro vezes mais resistentes e três vezes mais duros do que as ligas de alumínio, têm também valor de densidade três vezes superior (**Error! Reference source not found.**). Isso faz com que a sua utilização em aeronáutica esteja limitada a componentes críticos em que resistência e dureza são especialmente importantes (como o trem de aterragem, por

exemplo). Têm também sido usados para a skin de alguns aviões de alta velocidade, porque mantêm resistência a temperaturas acima de Mach 2, que excedem a capacidade dos alumínio.

Ligas de Titânio. As ligas de titânio apresentam uma relação resistência-peso excepcionalmente elevada numa larga gama de temperatura [14] (Figura 17) e são mais resistentes à corrosão do que os aços ou os alumínio. Embora o titânio seja mais oneroso, essas características têm conduzido a utilização crescente em aeronáutica (sobretudo a liga Ti6Al4V). As ligas de titânio são utilizadas nas lâminas de compressor e discos de turbina de aeronaves desde 1952 [14]. Atualmente, sua principal aplicação ainda são as turbinas (especialmente em fan-jets), que representam até 25 a 30% do peso da maioria dos motores modernos, incluindo lâminas, discos, invólucros e condutas [14]. Em aeronaves comerciais o uso de ligas de titânio em outros componentes estruturais tem evoluído lentamente devido ao seu elevado custo. Atinge atualmente cerca de 9% do peso do avião [14], incluindo fins específicos como tubagem hidráulica e piso de cozinha e de instalações sanitárias, onde é necessária elevada resistência à corrosão. É feito muito maior uso de ligas de titânio em aeronaves militares (35-50% em caças modernos), que operaram a temperaturas que excedem o limite de serviço de ligas de alumínio [14].

Superligas de níquel. O termo “superliga” aplica-se a ligas com elevada resistência mecânica e resistência à oxidação a alta temperatura. As superligas de níquel são essenciais para a indústria aeronáutica, onde são utilizadas para construir as partes mais quentes das turbinas de motores de aeronaves, embora tenham um valor de densidade quase 3,5 vezes superior ao do alumínio e sejam extremamente caras [17]. As superligas à base de níquel podem conter adições de ligas de cromo, cobalto, alumínio, titânio, rênio, rutênio e outros elementos. Os componentes são produzidos por solidificação cuidadosamente controlada, para obtenção de estrutura direcional otimizada ou monocristalina. Como resultado, os componentes fabricados a partir de superligas de níquel podem atingir valores de resistência a 1000 °C, que excedem os dos aços comuns à temperatura ambiente (Figura 17) [17].

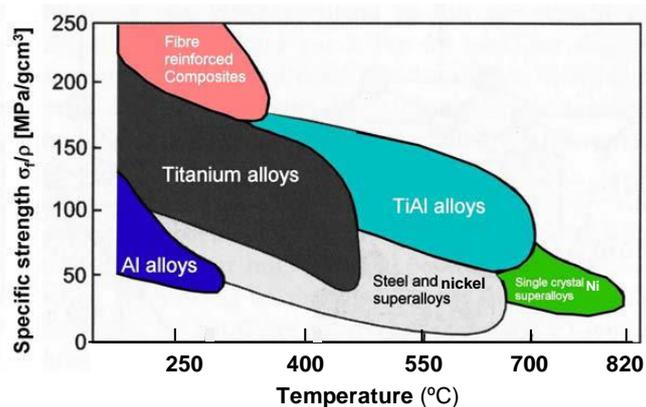


Figura 17. Variação de resistência específica (i.e., da razão entre a resistência do material e a sua densidade) de materiais aeronáuticos em função da temperatura (σ_f : resistência mecânica; ρ : densidade do material), adaptado de [18].

2.3.3 Plásticos Sintéticos

Os plásticos são materiais poliméricos que contêm substâncias destinadas a melhorar o seu desempenho e/ou a reduzir o seu custo (aditivos). Aditivos típicos incluem:

- **Estabilizadores:** prolongam a vida útil do polímero impedindo a oxidação e degradação resultantes da exposição à radiação UV.
- **Cargas (*fillers*):** melhoram o desempenho ou reduzem custos. A maioria das cargas são inertes e pouco onerosos (por exemplo giz, amidos, celulose, serradura, óxido de zinco).
- **Plastificantes:** são frequentemente o aditivo em maior quantidade; a sua função é aumentar a plasticidade ou diminuir a viscosidade do material durante o processamento.
- **Corantes:** compostos químicos na forma de tintas ou pigmentos usados para colorir o plástico.
- **Retardadores de chama.**

PLÁSTICO = POLÍMERO + ADITIVOS

A nomenclatura técnica dos plásticos é complexa e por vezes confusa [11], no entanto podem ser classificados com base nas suas gamas comerciais (Table 6).

Table 6. Classificação comercial de plásticos..

Classificação comercial	Descrição	Exemplo
Uso comum	polímeros de uso geral composição simples produção em massa baixo valor acrescentado	acrílicos, poliamidas, poliésteres, poliolefinas, seda artificial (rayon), PVC
Uso restrito	polímeros de uso específico produção em média escala médio valor acrescentado desempenho diferenciado	borrachas, poliuretanos, PET, PA, PU, PC
Especialidades	polímeros de elevado desempenho composição dedicada aplicações customizadas alto valor acrescentado	POM, PTFE, PBT, PPS, cristais líquidos

Devido ao seu desempenho mecânico intrinsecamente baixo (baixa resistência mecânica, baixa rigidez, baixa dureza), o papel dos polímeros como materiais monolíticos para construção de aeronaves é limitado a aplicações não-críticas. As principais áreas de aplicação incluem adesivos, revestimentos, espumas, vedantes, elastómeros e componentes plásticos [19]. Em cada caso, as condições de serviço devem ser levadas em consideração na seleção do material, pois os componentes da aeronave podem ser submetidos a uma variedade de condições extremas e incomuns (chuva, granizo, tempestades elétricas, variações de temperatura) [19], sendo que aplicações diferentes requerem propriedades diferentes. Os plásticos exibem uma ampla variedade de propriedades mecânicas, mas são caracterizados por uma propriedade física que é exclusiva de polímeros e vidros, a temperatura de transição vítrea [11]. A temperatura de transição vítrea (T_g) (Table 7) determina a gama de temperaturas de serviço dos plásticos e, conseqüentemente, a sua aplicação: abaixo de T_g , o polímero comporta-se de modo semelhante a vidro (duro e frágil), e acima de T_g o polímero torna-se flexível maleável como a borracha [11].

Table 7. Temperatura de fusão (T_f) e temperatura de transição vítrea (T_g) de alguns plásticos comuns [11].

Polymer	T_g (°C)	T_f (°C)
Polietileno (baixa densidade)	-110	115
Politetrafluoroetileno (ex: Teflon®)	-97	327
Polietileno (alta densidade)	-90	137
Polipropileno	-18	175
Nylon 6,6	57	265
Poliéster (PET)	69	265
Poli(cloreto de vinilo) (PVC)	87	212
Poliestireno (PS)	100	240
Borracha de poliisopreno	-72	n/a

A explosão que destruiu o spaceshuttle Challenger em 1986 ilustra tristemente esse conceito (Figura 18), já que resultou de um o-ring (vedante) de borracha que se tornou vítreo quando a temperatura do ar desceu abaixo da temperatura de transição vítrea do polímero. Em vez de formar uma vedação hermética, o anel plástico introduziu uma brecha na junta de propulsão do foguete, permitindo que o gás queimado pressurizado do motor alcançasse o exterior, onde colidiu com o tanque de combustível externo, causando a explosão do veículo [11]



Figura 18. O desastre do Challenger (1986).

Globalmente, a utilização de materiais com baixa densidade em componentes de potência e propulsão aeroespaciais pode levar a reduções significativas no peso do veículo e melhorias no desempenho e na eficiência. Os materiais poliméricos são adequados para muitas dessas aplicações, mas são necessárias melhorias na durabilidade e no desempenho para seu uso bem-sucedido em componentes críticos.

Os polímeros são no entanto um constituinte muito importante em compósitos de elevado desempenho, onde podem ser utilizados como material da matriz e/ou como material de reforço fibroso.

2.3.4 Compositos

Em aplicações aeroespaciais, em que a resistência mecânica é necessária mas o peso é um fator determinante, os compósitos laminados e compostos sanduíche são usados em grande extensão [11].

Compósitos laminados. Os laminados consistem em camadas de folhas com matriz polimérica reforçada com grande quantidade de fibras cerâmicas ou poliméricas incorporadas. Os compósitos de matriz epóxida reforçada com fibras de carbono (Figura 19 a c) são o material compósito mais amplamente utilizado em estruturas e componentes de aeronaves (embora

alguns outros estejam a ganhar relevância): são quase tão resistentes quanto as ligas de alumínio e têm cerca de metade da densidade. As fibras de carbono são tecidas e embebidas em resina (Figura 19 d)), formando um produto intermédio pré-impregnado (ou prepreg, Figura 19 e)). Essas folhas finas pré-impregnadas são fornecidas à indústria de construção de aeronaves, onde são empilhadas, moldadas na forma desejada (Figura 19 f) e consolidadas. O empilhamento pode ser efetuado de diferentes maneiras para atender às necessidades específicas de resistência ou rigidez de uma peça crítica, embora geralmente a estratificação seja realizada com fibras alinhadas em direções alternadas (Figura 19 h)).

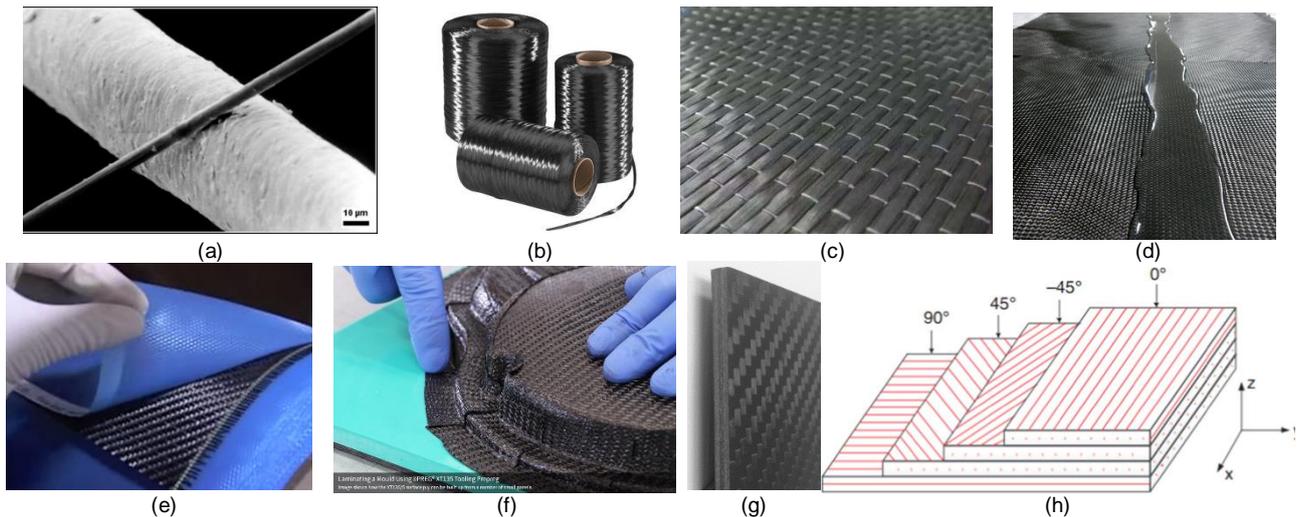


Figura 19. Compósitos laminados de matriz polimérica reforçados com fibras de carbono: (a) filamento de carbono com $6\ \mu\text{m}$ de diâmetro (em cima) comparado com cabelo humano; (b) os filamentos são enrolados formando feixes de fibras, que são então usados para (c) tecido de fibra de carbono. Em construção aeronáutica os tecidos são (d) previamente impregnados com resina epóxida, formando (e) folhas de prepreg que são posteriormente (f) empilhadas, moldadas e (g) consolidadas. (h) O empilhamento é geralmente efetuado de modo que as fibras em camadas adjacentes estejam alinhadas em direções alternadas [20].

Compósitos Sandwich. Os compósitos sandwich são compostos por duas folhas nas faces exteriores da peça, unidas a um material de baixa densidade no interior através de um adesivo adequado (Figura 20 a)). As folhas exteriores são responsáveis por lidar com a maioria das cargas e tensões aplicadas e podem ser em liga de titânio, liga de alumínio ou laminados compósitos reforçados com fibra produzidos conforme descrito acima (Figura 20 e-h)). Um material de baixa densidade é posicionado entre as folhas externas, com o objetivo de adicionar rigidez e resistência a tensões perpendiculares à superfície. Para aplicações aeronáuticas o núcleo interno é frequentemente uma estrutura em favo de abelha, em liga de alumínio (Figura 20 b)) ou polímero de alto desempenho (por exemplo Nomex®, Figura 20 c)). O conceito principal do painel sandwich é que as superfícies externas transferem as cargas causadas por flexão e compressão, enquanto o núcleo transfere cargas de corte (Figura 20 d)).

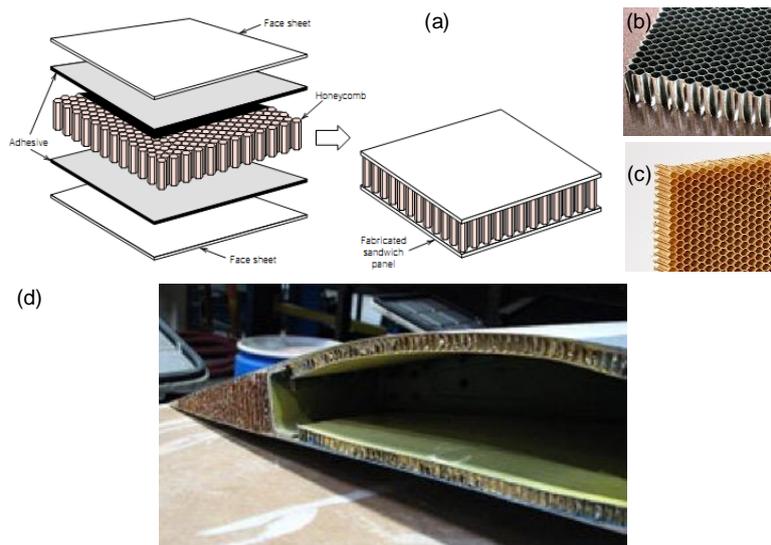


Figura 20. Compósitos sandwich: (a) empilhamento placa-adesivo-favo de abelha dando lugar a um painel sandwich [2]. Núcleo em favo de abelha: (b) alumínio; (c) polímero Nomex®. (e) Exemplo de aplicação de painel sandwich no *fore flap* do Boeing 747.

Os compósitos laminados e sandwich são também denominados compósitos estruturais, porque apresentam valores suficientemente elevados de propriedades mecânicas (incluindo resistência mecânica, rigidez e resistência à fadiga) para serem usados em aplicações críticas. Adicionalmente os compósitos têm valores de densidade muito baixos ($1/3$ a $1/2$ da densidade do alumínio) e elevada resistência à corrosão, o que os torna especialmente adequados para aplicações aeronáuticas (Table 8).

Table 8. Aplicações estruturais de compósitos reforçados com fibras em aeronáutica [21].

Compósito	Estrutura	Aplicação típica
Laminados	lâminas	skin da asa, skin do empeno vertical
	casca	secções da fuselagem
Sandwich	vigas	spars/ribs
	formas complexas	aerofoils
	paineis	Superfícies de controlo, secções do pavimento

Os materiais compósitos têm sido usados em aeronaves desde a Segunda Guerra Mundial. Um compósito reforçado com fibra de vidro foi usada pela primeira vez na aviação comercial pela Boeing, no anos 1950. Ao longo dos anos, os compósitos tornaram-se cada vez mais populares e hoje podem ser encontrados em muitos tipos de aviões, assim como em planadores. Estes materiais permitiram que os engenheiros aeronáuticos superar obstáculos encontrados ao utilizar materiais monolíticos e projetar estruturas com propriedades únicas. Cada nova geração de aeronaves construídas pelos principais fabricantes tem vindo a incorporar uma percentagem crescente de materiais compósitos, visando o projeto de aeronaves económicas e de elevado desempenho, com menor consumo de combustível, maior eficiência e custos operacionais diretos reduzidos.

3 PRINCÍPIOS DE VOO

3.1 Componentes de uma aeronave

Embora os aviões sejam projetados para uma variedade de propósitos, a maioria deles possui os mesmos componentes principais (Figura 21). As características gerais são amplamente determinadas pelos objetivos originais do projeto. A maioria das estruturas de aviões inclui fuselagem, asas, empenagem (estabilizadores verticais e horizontais), trem de aterragem e unidade de potência [22].

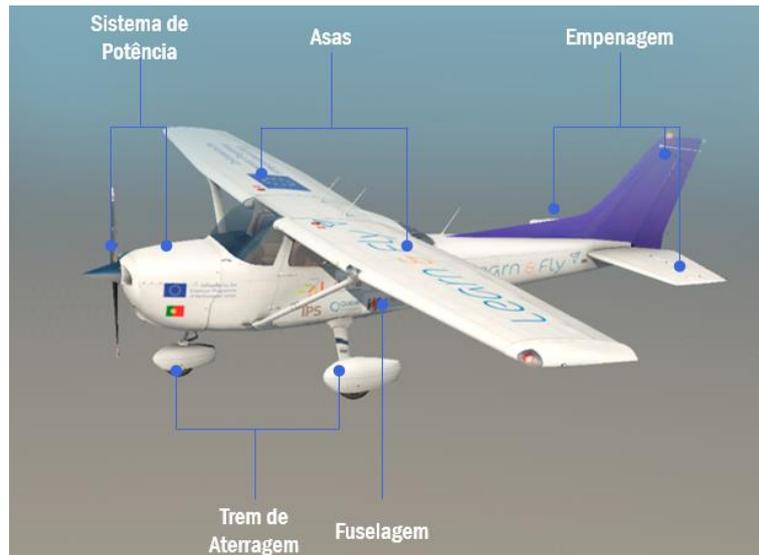


Figura 21. Componentes principais de uma aeronave

Fuselagem. A fuselagem (Figura 22) é o corpo central de um avião e foi projetada para acomodar a tripulação, passageiros e carga. Também permite a ligação estrutural para as asas, para o conjunto da cauda e o suporte para o motor (caso monomotor).



Figura 22. Fuselagem

Asas. As asas são perfis aerodinâmicos fixos a cada lado da fuselagem e são as principais superfícies de sustentação do avião em voo. Existem inúmeras formas, tamanhos e perfis de asas, dependendo da finalidade pretendida de um avião. No entanto, cada um deve atender às necessidades de requisitos em relação ao desempenho esperado para a finalidade de voo.

As asas podem ser montadas na parte superior, média ou inferior da fuselagem. Essas aeronaves são designadas por asa alta, média e baixa, respectivamente (Figura 23).



Figura 23. Asa alta (esquerda), asa média (centro) and asa baixa (direita)

O número de asas também pode variar. Aviões com um único conjunto de asas são chamados de monoplanos, enquanto aqueles com dois conjuntos são chamados de biplanos (Figura 24).

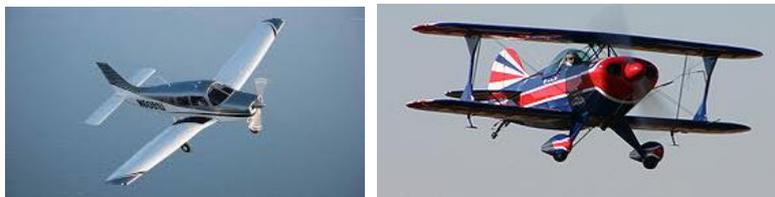


Figura 24. Monoplano (esquerda) and Biplano (direita)

Muitos aviões de asa alta têm tirantes externos ou suportes de asas, que transmitem as cargas de vôo e da aterragem através dos suportes para a estrutura principal da fuselagem. Como as hastes das asas geralmente são presas aproximadamente a metade da asa, esse tipo de estrutura é chamado semi-encastado. Alguns aviões de asa baixa têm asa encastrada completa projetada para transporte de cargas (Figura 25).



Figura 25. Asa semi-encastada (esquerda) e encastrada completa (direita)

As principais partes estruturais da asa são longarinas (normalmente frontal e traseira) e nervuras (Figura 26). Estes são reforçados por treliças, tubos ou outros dispositivos, incluindo a pele. As nervuras das asas determinam a forma e a espessura da asa (perfil aerodinâmico). Na maioria dos aviões modernos, os tanques de combustível são parte integrante da estrutura da asa ou consistem em contentores flexíveis montados dentro da asa.

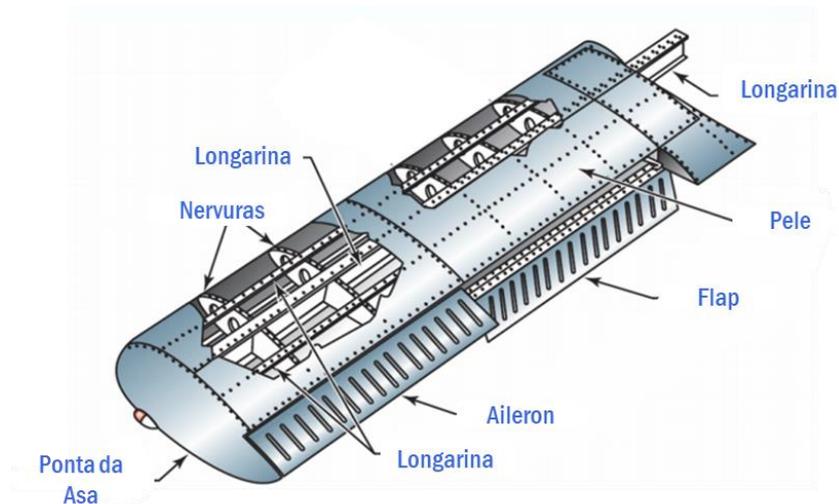


Figura 26. Componentes de uma asa

Empenagem. O nome correto para a seção de cauda de um avião é empenagem (Figura 27). A empenagem inclui todo o grupo de cauda, consistindo em superfícies fixas, como o estabilizador vertical e o estabilizador horizontal e as superfícies móveis (incluem o leme, o leme de profundidade e um ou mais superfícies de compensação).

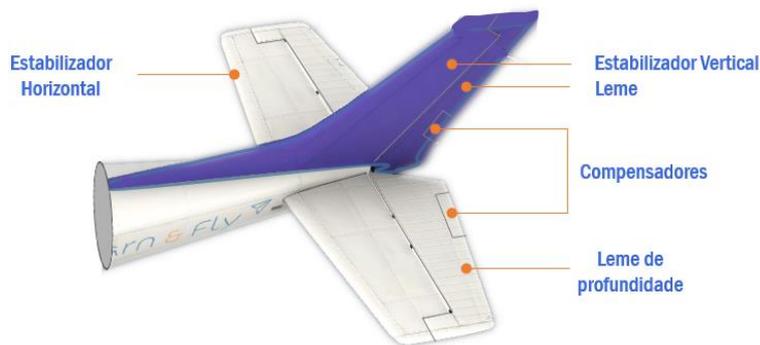


Figura 27. Componentes principais da empenagem

Trem de aterragem. O trem de aterragem é o principal suporte do avião quando parado, a taxiar, a decolar ou a aterrissar. O trem de aterragem consiste em três rodas: duas rodas principais e uma terceira roda posicionada na frente ou na traseira do avião (Figura 28). O trem de aterragem com uma roda traseira é chamado de trem de aterragem convencional. Aviões com trem de aterragem convencional são também chamados de aviões de roda traseira. Quando a terceira roda está localizada no nariz, ela é chamada de roda de nariz e diz-se que a aeronave tem um trem de aterragem de triciclo.



Figura 28. Trem de aterragem convencional (esquerda) e trem de triciclo (direita)

A roda dianteira ou a traseira é direcionável para permitir que o avião seja controlado durante as operações de manobras no solo. A maioria das aeronaves é dirigida movendo os pedais do leme, seja na roda do nariz ou na traseira. Além disso, algumas aeronaves são dirigidas através de uma travagem diferencial no trem principal.

Sistema de Potência. O sistema de potência geralmente inclui o motor e a hélice (Figura 29). A principal função do motor é fornecer energia para girar a hélice. O motor é coberto por uma capota ou, no caso de alguns aviões, cercado por uma nacele. O objetivo da capota ou da nacele é otimizar o fluxo de ar ao redor do motor e ajudar a arrefecer o motor, insuflando ar em torno dos cilindros. A hélice, montada na frente do motor, transforma a energia de rotação deste numa força de tração segundo o eixo longitudinal chamada de impulso que ajuda a mover o avião pelo ar.

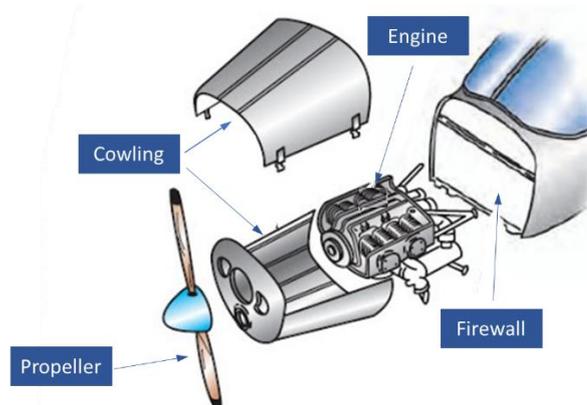


Figura 29. Sistema de potência (motor e hélice)

3.2 AERODINÂMICA DE VOO

Tração, arrasto, sustentação e peso são forças que atuam nas aeronaves em voo. Compreender como essas forças funcionam e saber controlá-las com o uso de controles de potência e de voo são essenciais para o voo. Esta seção discute a aerodinâmica do voo - como o projeto, peso, fatores de carga e gravidade afetam uma aeronave durante as manobras de voo [23,24]. As quatro forças que atuam em uma aeronave em voo linear e nivelado (velocidade de cruzeiro) são: tração, arrasto, sustentação e peso (Figura 30).



Figura 30. Forças aplicadas a um avião em voo

Estas forças são definidas do seguinte modo:

- Tração — é a força que responsável por deslocar horizontalmente a aeronave pelo ar. A tração é igual ou superior à força de arrasto. A tração é criada pelos motores da aeronave através do sistema de potência. Como regra geral, atua paralelamente ao eixo longitudinal.



- Arrasto — é a força que se opõe ao movimento causado pela interrupção do fluxo de ar pela asa, fuselagem e outros objetos salientes. O arrasto opõe-se à força de tração e tem o sentido para trás paralelamente ao vento relativo.



- Peso — é a força combinada da própria aeronave, a tripulação, o combustível e a carga ou bagagem. O peso atua na aeronave com sentido para baixo devido à ação da gravidade. O peso está aplicado no Centro de Gravidade da aeronave (CG).



- Sustentação — opõe-se à força do peso. É gerada pelo efeito dinâmico do ar que atua no perfil aerodinâmico da asa e é perpendicular ao percurso de voo com ponto de aplicação no centro de sustentação.



Perfil aerodinâmico. O perfil aerodinâmico é a superfície projetada para obter sustentação do ar através do qual se move [25]. A corda, a espessura e a forma (superfície superior e inferior) do perfil são fundamentais para gerar sustentação. Normalmente, a superfície superior tem uma curvatura mais pronunciada (curvatura) do que a superfície inferior, Figura 31. É essa diferença nas superfícies de curvatura que gera sustentação quando um fluido (ar) gira o perfil.

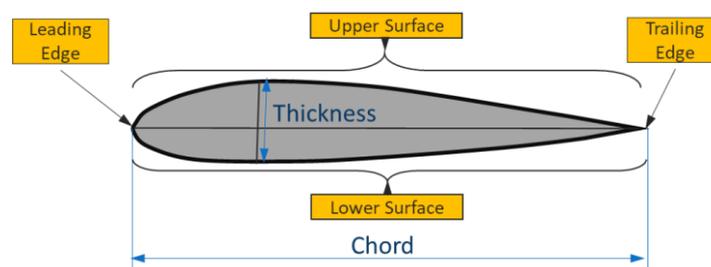


Figura 31. Dimensões principais do perfil aerodinâmico

Princípio de Bernoulli's. O princípio de Bernoulli é usado para explicar a geração da força de sustentação. Pode ser derivado do princípio de conservação de energia, que afirma que, em fluxo constante, a soma de todas as formas de energia num fluido ao longo de uma linha de corrente é a mesma em todos os pontos dessa linha de corrente:

$$E_c + E_p = k \quad (2)$$

Onde

E_c – Energia Cinética

E_p – Energia Potencial

k - Constante

Devido à curvatura da superfície superior do perfil aerodinâmico, a velocidade do ar aumenta (energia cinética) e a pressão (energia potencial) diminui. Uma pressão mais baixa é criada na superfície superior. A diferença de pressão entre a superfície superior e a superfície inferior está relacionada à força de sustentação (Figura 32 e Figura 33).

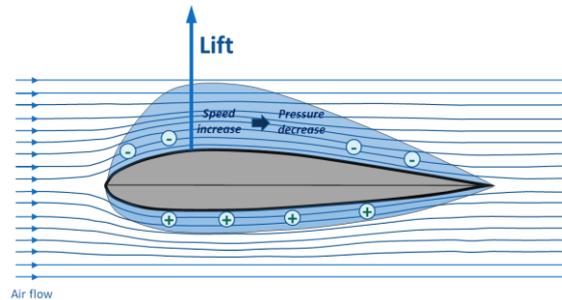


Figura 32. A geração de sustentação num perfil aerodinâmico.

Equação de sustentação

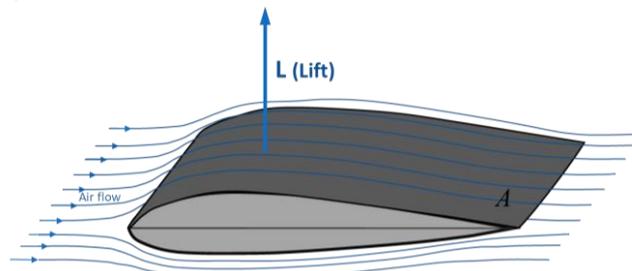


Figura 33. Amostra de asa para cálculo da sustentação

A força de sustentação L de um perfil aerodinâmico pode ser alcançada pela equação:

$$L = \frac{1}{2} \rho v^2 A C_L \quad (3)$$

Onde

L – Força de sustentação (N – Newton)

ρ – Densidade do ar (1.225 kg/m³ at 15°C and 1013 hPa)

v – Velocidade do ar (m/s)

A – Superfície da área da asa (m²)

C_L – Coeficiente de sustentação (sem dimensão)

Coeficiente de Sustentação C_L . O coeficiente de sustentação C_L é obtido experimentalmente. Depende da forma do perfil e do ângulo de ataque α (Figura 34 e Figura 35). O ângulo de ataque α (também conhecido como AoA) é o ângulo entre o a corda do perfil aerodinâmico e a direção do fluxo de ar.

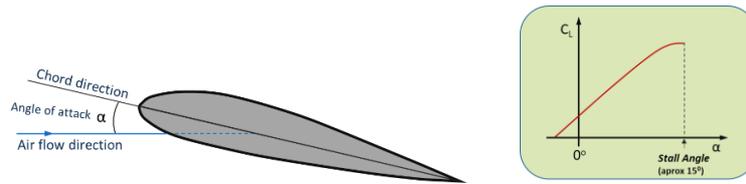


Figura 34. Ângulo de ataque (AoA) e função CL do AoA

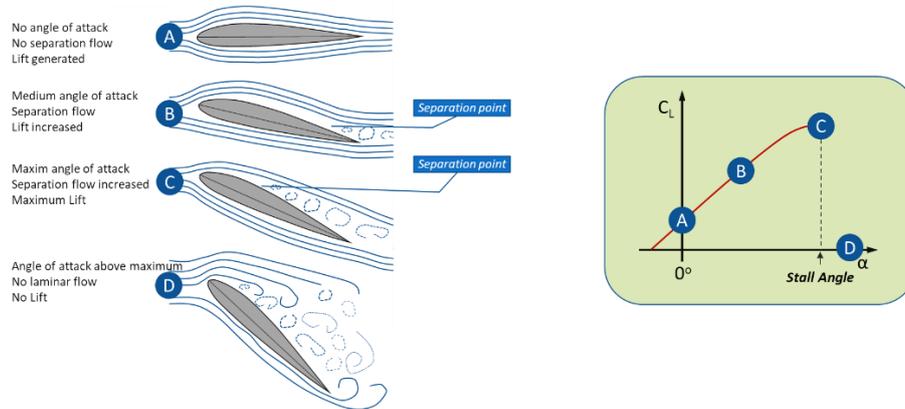


Figura 35. Max ângulo de ataque, ângulo tenda

Força de arrasto. O arrasto é a força aerodinâmica que se opõe ao movimento de uma aeronave no ar. O arrasto é gerado por todas as partes do avião. O arrasto age em uma direção oposta ao movimento da aeronave. A equação de arrasto é semelhante à equação de sustentação e é dada por:

$$D = \frac{1}{2} \rho v^2 A C_D \quad (4)$$

Onde

D – Força de arrasto (N - Newton)

ρ – densidade do ar (1.225 kg/m³ at 15°C and 1013 hPa)

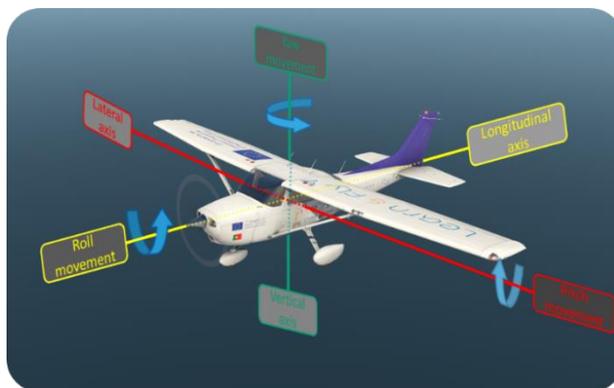
v – Velocidade do ar (m/s)

A – Superfície da área da asa (m²)

C_D – Coeficiente de arrasto (sem dimensão)

3.3 EIXOS DE MOVIMENTO DE AERONAVES

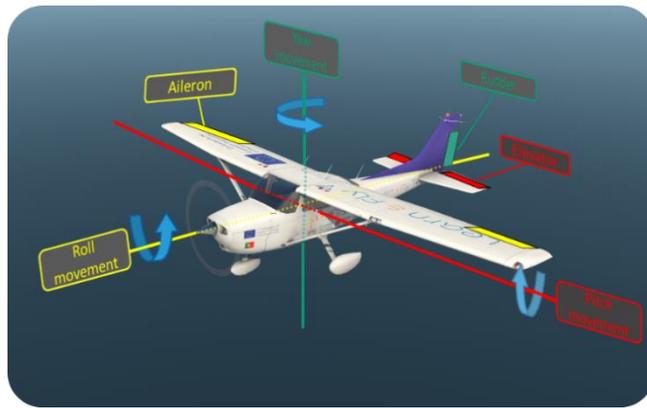
Sempre que um avião muda a sua atitude ou posição de voo, gira cerca de um ou mais de três eixos, que são linhas imaginárias que passam pelo centro de gravidade do avião. Os eixos de um avião podem ser considerados eixos imaginários em torno dos quais o avião gira. O eixo, que se estende longitudinalmente através da fuselagem do nariz até a cauda, é o eixo longitudinal. O eixo, que se estende transversalmente da ponta da asa até a ponta da asa, é o eixo lateral. O eixo, que passa verticalmente através do centro de gravidade, é o eixo vertical (Figura 36).



Axis	Movement
Lateral	Pitch
Longitudinal	Roll
Vertical	Yaw

Figura 36. Três eixos de uma aeronave

À luz da adoção de termos náuticos [26], o movimento sobre o eixo longitudinal do avião é chamado de "rolagem"; o movimento em torno de seu eixo lateral é chamado de "inclinação". Finalmente, um avião move-se em torno do seu eixo vertical num movimento denominado "guinada" - ou seja, um movimento horizontal (esquerdo e direito) do nariz do avião.



Movement	Surface Control
Pitch	Elevator
Roll	Aileron
Yaw	Rudder

Figura 37. Movimentos de controlo de voo de uma aeronave

As superfícies de controlo de voo da aeronave são dispositivos aerodinâmicos que permitem ao piloto ajustar e controlar a atitude de voo da aeronave em torno dos três eixos (Figura 37). Para controlar o movimento de arfagem, o piloto usa a superfície dos elevadores. Se o piloto puxar o manípulo para trás, o elevador move-se para cima e a aeronave gira em torno do eixo transversal e a aeronave sobe (Figura 38).

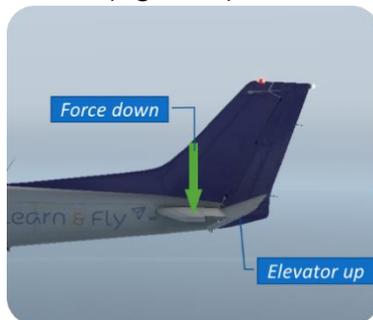


Figura 38. A posição de controlo da superfície do elevador sobe

Se o piloto puxar o manípulo, o elevador move-se para baixo e a aeronave gira em torno do eixo transversal e a aeronave desce (Figura 39).

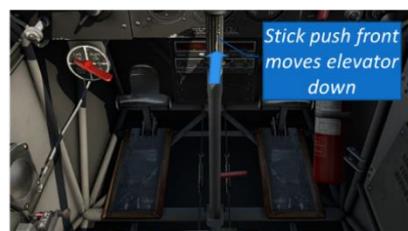


Figura 39. A posição de controlo da superfície do elevador desce

Quando o piloto deseja rodar para a direita, move o manípulo para a direita. O aileron esquerdo desce e o aileron direito sobe. Como resultado, a força de sustentação na asa esquerda aumenta e na asa direita a força de sustentação diminui. A aeronave roda para a direita (Figura 40).



Figura 40. Movimento para a direita

Se o piloto quiser sair da rodagem, move o manípulo para a esquerda. O movimento dos ailerons é mostrado na Figura 41. Como resultado, a força de sustentação na asa direita aumenta e na asa esquerda a força de sustentação diminui. A aeronave roda para a esquerda.



Figura 41. Movimento para a esquerda

Quando o piloto deseja girar a aeronave em torno do eixo vertical (movimento de guinada), usa os pedais conectados ao leme. Se quiser virar para a esquerda, pressiona o pedal esquerdo, o leme vai para a esquerda, empurra a cauda para a direita e a aeronave guina para a esquerda (Figura 42).



Figura 42. Movimento para a esquerda

Se o piloto quiser ir para a direita, pressiona o pedal direito, o leme vai para a direita, empurra a cauda para a esquerda e a aeronave para a direita (Figura 43).



Figura 43. Movimento para a direita

3.4 MASSA E EQUILÍBRIO

O peso é um fator importante na construção e operação do avião e exige respeito de todos os pilotos e diligência particular por todo os colaboradores de manutenção. O excesso de peso reduz a eficiência de uma aeronave e a margem de segurança disponível, se surgir uma condição de emergência [27].

Uma consideração importante antes do voo é a distribuição de peso na aeronave. Carregar a aeronave para que o peso bruto seja menor que o máximo permitido não é suficiente. Esse peso deve ser distribuído para manter o centro de gravidade (CG) dentro dos limites (Figura 44).



Figura 44. Centro de Gravidade e uma aeronave equilibrada

O centro de gravidade de um corpo é o ponto teórico no qual se supõe que todo o peso desse corpo esteja concentrado. Deve notar-se que, se o corpo for suspenso pelo GC, permanecerá em equilíbrio. Se o Centro de Gravidade (CG) de uma aeronave estiver completamente fora dos limites, situações como a mostrada na Figura 45 podem ocorrer.



Figura 45. Aeronave desequilibrada no chão

Para garantir que a aeronave possa voar com segurança, o CG deve estar dentro dos limites especificados, estabelecidos pelo fabricante da aeronave. Antes do voo, os pilotos devem garantir que o CG esteja dentro dos limites.



a) b)
Figura 46. Exemplos de aeronaves desequilibradas

Se o CG estiver muito à frente, a aeronave tende a inclinar-se para baixo (Figura 46 a). Se o CG está muito atrasado, a aeronave tende a inclinar-se para cima. (Figura 46 b).

Antes de iniciar um voo, o piloto deve calcular o peso total da aeronave (peso vazio da aeronave, combustível, passageiros e carga) e se o CG está dentro dos limites.



Figura 47. Vários componentes para calcular o peso total

Existem várias forças a considerar no cálculo do GC (Figura 47). A linha de referência é uma linha de referência para estabelecer os braços das várias forças necessárias para determinar o CG. Por exemplo, no Cessna, como mostrado na figura, a linha de referência repousa sobre o mecanismo de firewall. Noutras aeronaves, geralmente a linha de referência corresponde ao trem de pouso do nariz da perna. A posição do CG deve ser calculada e verificada se estiver dentro dos limites e pode ser alcançada pela equação:

$$CG = \frac{\sum \text{Peso} \times d}{\sum \text{Peso}} = \frac{W_1 d_1 + W_2 d_2 + W_3 d_3 + \dots + W_n d_n}{W_1 + W_2 + W_3 + \dots + W_n} \quad (6)$$

Em que:

$W_{...}$ é o peso individual de cada componente (n componentes)

d é a distância de cada peso até a linha de referência (n braços)



Figura 48. Limites de Avanço e Posterior

O CG deve sempre permanecer entre os limites FWR (Avanço) e AFT (Posterior) para operar a aeronave com segurança.

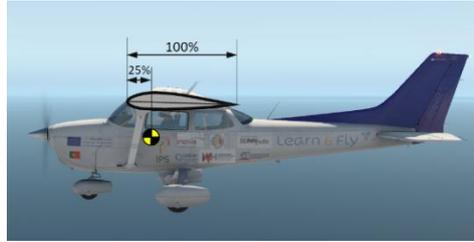


Figura 49. Posição ideal para CG

A localização longitudinal do GC deve estar a 25% da corda da asa.

A magnitude do limite FWR é normalmente 10% da corda da asa e a AFT é 30%.

4 PROCESSOS E TECNOLOGIA

4.1 INTRODUÇÃO

Os processos e tecnologias propostos no Kit Learn & Fly para alunos para construir o planador para o desafio estão próximos das técnicas tradicionais de artesanato usadas na construção de modelos de aviões. Eles são explicados passo a passo nos slides correspondentes, permitindo atingir o objetivo desejado. No entanto, realmente não refletem os processos complexos, o equipamento sofisticado e a especialização necessária das instalações pelas quais os produtos aeroespaciais são feitos, nem os enormes desafios apresentados pela complexidade envolvida no projeto e fabricação de contorno aerodinâmico com controle de peso [28]. Assim, foi considerado útil fornecer algumas dicas sobre as estratégias de fabricação do setor.

4.2 INDÚSTRIA AEROESPACIAL

A indústria aeroespacial diz respeito às estratégias de fabricação relacionadas ao voo veicular dentro e fora da atmosfera da Terra [7]. Dedicar-se à pesquisa, desenvolvimento e fabricação de veículos aéreos tripulados e não tripulados, incluindo planadores e planadores não-motorizados, embarcações mais leves que o ar (por exemplo, balões e aeronaves), embarcações mais pesadas que o ar (aeronaves comerciais e militares), mísseis e foguetes, veículos espaciais e naves espaciais [7]. Também inclui os principais subsistemas de veículos de voo, como propulsão e aviônicos (eletrônicos de aviação), e os principais sistemas de suporte necessários para o teste, operação e manutenção de veículos de voo [7]. Além disso, a indústria está envolvida na fabricação de produtos e sistemas não aeroespaciais que fazem uso da tecnologia aeroespacial [7].

A linha de produtos da indústria aeroespacial é ampla porque seus produtos principais, veículos de voo, exigem até cinco milhões de peças individuais [7]. Além disso, muitos sistemas de suporte são necessários para operar e manter os veículos. As aeronaves militares têm a maior participação de mercado, seguidas pelos sistemas espaciais e aeronaves civis, enquanto os mísseis e outros veículos aéreos não tripulados (UAV) ainda são grupos modestos [7]. Os clientes do setor variam de pessoas físicas a grandes corporações e linhas aéreas comerciais, empresas de telecomunicações e agências militares e outras governamentais [7].

4.3 PROCESSOS E TECNOLOGIAS EM ENGENHARIA DE AERONAVES

A aeronave e os processos pelos quais são fabricadas são complexos e envolvem pessoal especializado e equipamentos e instalações sofisticados (o tamanho dos próprios produtos exige estruturas maciças para abrigar a sua montagem) [7]. O desenvolvimento e a produtividade da indústria dependem criticamente de investimentos substanciais em pesquisa, enquanto o desenvolvimento subsequente do produto e a transição de novas tecnologias para a produção por meio de projeto e teste também envolvem inúmeros processos e práticas [7].

4.3.1 Pesquisa

O progresso tecnológico é a base para a competitividade e o avanço na indústria aeronáutica. Como resultado, esta indústria é líder mundial no avanço da ciência e da tecnologia [7]. Devido à complexidade dos produtos finais, os avanços geralmente exigem melhorias em muitas disciplinas tecnológicas, incluindo ciência de materiais, eletrônica, automação e controle, mecânica de fluidos, entre muitas outras. A indústria aeronáutica do mundo realiza pesquisas e

desenvolvimento por si própria e em conjunto com agências governamentais e a academia. O objetivo final do esforço é a criação de veículos de voo mais avançados que seus antecessores [7].

O foco atual da pesquisa de aeronaves inclui [7]: redução de peso das estruturas da aeronave, através de pesquisas contínuas em materiais compósitos e investigação de alumínio-lítio e outras ligas de alumínio; pesquisa de materiais para veículos supersônicos e hipersônicos focados em polímeros de alta temperatura, metais leves e compósitos de matriz polimérica de alta temperatura; sistemas de visão aprimorados usando câmaras de vídeo e infravermelho ou tecnologia de radar de ondas milimétricas para melhorar a operação em qualquer clima de aeronaves comerciais; técnicas fly-by-light que transmitem comandos através de cabos de fibra óptica em vez de eletricamente; maior previsibilidade da vida útil do veículo através do desenvolvimento de técnicas de avaliação não destrutivas; e miniaturização de instrumentos, sistemas de propulsão, fontes de energia e outros componentes. Instruções importantes de pesquisa também incluem autonomia de veículo, sistemas microeletrônicos e microeletromecânicos, arquitetura modular e sistemas multifuncionais e matrizes solares de alta eficiência [7].

4.3.2 Desenvolvimento de produto

O processo de desenvolvimento de aeronaves difere entre os setores militar e comercial. No setor de aeronaves civis, os fabricantes realizam estudos de mercado detalhados para determinar a necessidade de novos designs de veículos, depois definem especificações, anunciam aos potenciais clientes a sua intenção de desenvolver o novo produto e solicitam pedidos [29]. Quando pedidos suficientes são obtidos, o programa é iniciado oficialmente. Os engenheiros dos clientes geralmente trabalham em conjunto com os fabricantes para influenciar o design final para as suas necessidades específicas [7]. O projeto de aeronaves é, portanto, um compromisso entre muitos fatores e restrições concorrentes e explica os requisitos de projeto e mercado existentes para produzir a melhor aeronave [29].

Nos primeiros anos do design de aeronaves, os projetistas usaram a teoria analítica para fazer os vários cálculos de engenharia que entram no processo de design, juntamente com muitas experiências. Esses cálculos eram trabalhosos e demorados. Na década de 1940, formas de automatizar e simplificar o processo de cálculo e muitas relações e fórmulas semi-empíricas foram desenvolvidas [29]. Mesmo após a simplificação, os cálculos continuaram a ser extensos. Com a invenção do computador, a maioria dos cálculos poderia ser automatizada, mas a falta de visualização do projeto e a enorme quantidade de experimentação envolvida mantiveram o campo do design de aeronaves estagnado, mas o aumento das linguagens de programação permitiu que os engenheiros escrevessem programas sob medida e projetar uma aeronave. Originalmente, isso era feito com computadores mainframe e usava linguagens de programação de baixo nível; com a introdução de computadores pessoais, os programas de design começaram a empregar uma abordagem mais amigável [29].

O ciclo de projeto de um novo veículo de voo mudou radicalmente desde a década de 1980 devido a novos métodos, ferramentas (incluindo computadores) e diretrizes disponíveis [7]. Tradicionalmente, o ciclo começa com um design conceptual do produto geral, seguido pelo design preliminar, no qual a maioria ou todos os subsistemas tomam forma. Várias interações relacionadas com a análise de tensões, aerodinâmica e análise de materiais devem ser realizadas antes que um projeto final seja alcançado. Como nem todos os problemas de produção podem ser previstos por designers e engenheiros, é necessário um retrabalho substancial. Apesar da aparente simplicidade da fase inicial do projeto conceptual, 70-80% do custo da aeronave é

determinado nesta fase. O uso do computador mudou fundamentalmente o processo e o custo de desenvolvimento. Todos os detalhes, da estrutura ao subsistema elétrico, são armazenados no computador e, ao criar modelos 3D (ou seja, veículos de voo virtuais) de candidatos em potencial com base nos conjuntos de dados inseridos no computador, elimina a necessidade de modelos físicos em tamanho real (conhecidos como modelos) nos quais os engenheiros verificam os layouts de design [7]. Ao permitir o exame rápido de várias configurações candidatas sob o efeito das condições de voo, ele também substitui uma parte dos caros testes em túneis de vento [7]. (O teste de túnel de vento é uma parte muito importante do processo de desenvolvimento na indústria aeroespacial: o ar é soprado sobre uma seção de teste de um modelo de aeronave, ou sobre modelos de teste de escala reduzida, criando um efeito comparável ao voo num selecionado número). Assim, o computador mudou fundamentalmente o processo de desenvolvimento, permitindo a modelagem e simulação digital, bem como design assistido por computador, em conjunto com a fabricação auxiliada por computador (CAD / CAM) [7] (§ Módulo 5).

A fase de construção e teste do protótipo segue [7,28]. Um procedimento habitual é construir vários aviões de teste apenas para verificar o projeto. A integridade estrutural da aeronave é avaliada em testes estáticos e dinâmicos. O teste de solo requer uma variedade de instalações, incluindo fornos para aplicação de altas temperaturas a materiais, câmaras acústicas para permitir o estudo do efeito do ruído do motor de alta frequência em estruturas, plataformas para medir impactos de aterragem e vibradores de frequência variável para investigações de vibração e características absolutas das estruturas [7]. Os equipamentos de teste verificam se o fator de carga final exigido no projeto foi atendido ou excedido; por exemplo, as asas podem ser carregadas até quebrar. Em testes dinâmicos ou de fadiga, a vida útil da aeronave é simulada no estilo lapso de tempo [7]. Assim, um avião pode passar por mais de 100.000 "horas de voo" equivalentes antes de ser desmontado e examinado completamente em todos os detalhes. Os testes também são realizados em equipamentos auxiliares. Os sistemas estruturais e mecânicos são testados de maneira semelhante à descrita para estruturas de aeronaves, enquanto os equipamentos elétricos e eletrônicos são exaustivamente verificados por testes eletrônicos. À medida que o equipamento é executado em seu ciclo de desempenho, os monitores confirmam ou detectam e isolam falhas para correção. Em muitos casos, sistemas completos são verificados em câmaras de altitude que simulam ambientes operacionais [7]. Os motores são testados numa célula de teste capaz de simular as condições de voo: para se qualificar para a instalação, um novo motor passa por várias centenas de horas de testes que abrangem toda a faixa pretendida de velocidade, altitude e capacidade de resistência do avião; o ataque de pássaros também é simulado. Os mecanismos de teste são fortemente instrumentados e os dados gravados são transmitidos para um computador para processamento. Após a execução do teste, os motores são completamente desmontados e inspecionados. O teste de voo é então necessário para validar os resultados individuais, embora os procedimentos modernos de projeto computadorizado e teste de túnel de vento sejam tão completos e extensos que os resultados da fase de teste de voo raramente dizem grandes alterações de projeto [7].

A certificação da aeronave leva aproximadamente um ano, onde todas as aeronaves devem demonstrar capacidade em vários testes de desempenho em todas as condições previstas, incluindo frenagem de emergência, testes de perda de impulso do motor e descolagem e aterragem em temperaturas extremamente quentes, frias e de alta altitude, e ambientes de baixa altitude [7].

Depois de uma aeronave civil ter demonstrado a sua aeronavegabilidade no programa de certificação de voo, poderá entrar em serviço regular. O certificado necessário (chamado certificado de tipo, TC) é emitido pelas autoridades nacionais do país do construtor de aeronaves

- a Autoridade Nacional de Aviação (NAA). Na Europa, o TC para aeronaves Airbus é emitido pela Agência Europeia para a Segurança da Aviação da NAA (EASA); nos Estados Unidos, o TC para aeronaves Boeing é emitido pela NAA-Federal Aviation Administration (FAA) [7]. Esses certificados são necessários para qualquer aeronave comprada na Europa ou nos Estados Unidos, respectivamente, e servem em todo o mundo como base para a certificação de aeronaves civis que devem entrar em serviço nesses países. A Rússia e a China têm processos de certificação amplamente modelados nos padrões americanos e europeus. Os fornecedores de aeronaves mais importantes do Brasil, Japão e Indonésia usam os padrões de certificação americano e europeu [7].

4.3.3 Fabricação

A fabricação moderna de aeronaves foi descrita como um processo artesanal com uma mentalidade de produção em massa. De facto, grandes aeronaves consistem na montagem de um a cinco milhões de peças separadas e cada tipo diferente exige habilidades e métodos de fabricação exclusivos [7].

Contexto histórico. Os processos modernos de fabricação aeroespacial evoluíram no contexto do desenvolvimento histórico do design de veículos de aeronaves resumido anteriormente (§ Módulo 1). As armações de madeira das aeronaves durante a Primeira Guerra Mundial exigiram marceneiros qualificados e os seus equipamentos, juntamente com artesãos (geralmente mulheres) que ataram ou costuraram tecidos nas armações. Essa pele foi pintada com lacas à base de acetona para apertar e endurecer as superfícies, portanto as fábricas tinham grandes áreas de pincel ou spray com circulação de ar natural ou induzida para melhorar a secagem e a dissipação dos vapores [7]. Ao mesmo tempo, com exceção dos projetos de motores refrigerados a ar desenvolvidos pelos irmãos Wright, a fabricação de motores de aeronaves era uma extensão da produção de motores automotivos refrigerados a líquido, exigindo técnicas refinadas de maquinação para as aletas da cabeça do cilindro, o que proporcionava a extensa superfície de refrigeração necessárias.

O advento das estruturas metálicas mudou tanto o caráter dos processos de fabricação quanto as competências exigidas aos trabalhadores da produção [7]. A princípio, apenas a estrutura de madeira das fuselagens foi substituída por treliças tubulares de alumínio conectadas a prendedores mecânicos ou de soldagem; os revestimentos ainda eram costurados e colados. Em meados da década de 1930, à medida que as ligas de alumínio laminadas finas se tornaram disponíveis, as estruturas metálicas para fuselagens e as asas tornaram-se predominantes. Foram necessários artesãos qualificados para operar as máquinas para trabalhar metais, e uma nova ênfase foi colocada na rebiteagem e na soldagem e no ferramental rígido dos acessórios para facilitar o alinhamento e a montagem. Ao mesmo tempo, o forjamento de componentes do trem de pouso e os principais acessórios estruturais e a formação de chapas metálicas passaram a assemelhar-se a processos na indústria automobilística. Essa afinidade tornou-se particularmente próxima à medida que bombardeiros e transportes totalmente metálicos revolucionavam a fabricação de aviões. Não era de surpreender, portanto, que os produtores em massa de automóveis e equipamentos relacionados se tornassem fabricantes de aviões militares durante a Segunda Guerra Mundial.

Após a guerra, a propulsão a jato e outros avanços técnicos levaram a novas mudanças nas técnicas e processos de fabricação [7]. As viagens aéreas comerciais exigiam maior capacidade

de passageiros e aeronaves maiores. Isso exigiu, por sua vez, instalações ampliadas e uma comunidade de empreiteiros de submontagens estruturais que construíam asas, seções de fuselagens e superfícies horizontais que começaram a aliviar parte do espaço e as necessidades de ferramentas dos contratantes principais. Atualmente, os programas de produção de aeronaves incorporam uma gama completa de hardware e software, de fornecedores que operam como subcontratados ao contratante principal ou integrador de sistemas, cobrindo o equipamento de bordo, mas também os principais elementos da estrutura da aeronave. Devido à extensa gama de competências e instalações necessárias, as empresas não constroem um veículo de voo inteiro [7].

Processo de fabricação e tecnologias. A fabricação envolve a produção de componentes individuais que compõem conjuntos maiores ou produtos finais. Essa atividade abrange o trabalho de metais e a incorporação de dispositivos elétricos e eletrônicos em processadores, placas de circuito e subconjuntos para os componentes dos sistemas de navegação, comunicação e controle [7]. A fabricação na indústria de aeronaves ultrapassa quase todos os limites da construção - por exemplo, oficinas de máquinas convencionais para componentes mecânicos, salas limpas para peças eletrônicas e instalações de montagem final incomumente grandes para aeronaves de cem toneladas [7].

Os materiais (§ Módulo 2) desempenham um papel importante nos métodos de fabricação [7]. A maioria dos métodos básicos de fabricação de metal tem sido utilizada desde a Segunda Guerra Mundial [7]. Os metais são cortados, modelados, perfurados, dobrados e formados por ferramentas e máquinas operadas manualmente ou, cada vez mais, sob o controle de computadores programados (CNC) para orientar as operações necessárias de forma consistente e com maior precisão do que normalmente pode ser fornecido por seres humanos [7]. As diferenças modernas, como tolerâncias mais rigorosas ao corte de metal, estão relacionadas aos avanços nas capacidades de máquinas e ferramentas. A fabricação de novos metais, como ligas de alumínio-magnésio e ligas de titânio e seus produtos, criaram novos desafios, exigindo maquinaria e retificação especializadas [7] (§4.4).

Na produção de componentes que devem suportar altas cargas, o mais leve possível, os fabricantes aeroespaciais desenvolveram técnicas de engenharia para modificar as propriedades dos materiais. Os compósitos estão a tornar-se cada vez mais parte das superfícies externas das aeronaves, portanto, a maioria dos fabricantes de estruturas incorpora a tecnologia de fabricação necessária nas suas fábricas [7]. Um exemplo notável são as sanduíches de favo de mel, muito mais leves que uma placa de metal de espessura comparável e com maior resistência à flexão. Os compósitos laminados de matriz polimérica são valorizados na indústria aeroespacial pela sua rigidez, leveza e resistência ao calor. Estes são fabricados em resinas poliméricas nas quais as fibras de carbono são ligadas entre si, na forma de laminado ou sanduíche. Para atingir as forças exigidas, os laminados devem ser curados com resina no vácuo, obtidos em sacos de borracha evacuados ou em autoclaves (câmaras com temperatura e pressão controladas).

Montagem. Montagem é a reunião das unidades constituintes da aeronave, os subconjuntos [7]. Um exemplo de um subconjunto típico de uma aeronave comercial é a seção traseira da fuselagem, que é composta por vários segmentos. (Esses segmentos geralmente são construídos por subcontratados que, por sua vez, lidam com os seus próprios fornecedores dos elementos constituintes dos segmentos). Os segmentos são levados para a área de submontagem, onde equipas de trabalhadores os levam para acessórios de apoio e os juntam a uma unidade, na qual o equipamento interno é instalado [7]. De modo semelhante, as equipas montam outros subconjuntos, como as seções restantes da fuselagem, seções de asas, seções de cauda e nacelas

do motor. A integração dos componentes de um subconjunto ocorre frequentemente em caixas-pretas que envolvem subelementos eletrônicos e elétricos, com conectores que fazem interface com vários sistemas da aeronave [7].

O desempenho de submontagens como unidades é verificado antes da sua integração nas montagens finais. No caso de subconjuntos estruturais, a verificação geralmente refere-se a testes de carga, alinhamento e garantia de dimensões e tolerâncias e verificações de conformidade elétrica para cabeamento instalado [7]. Para submontagens com componentes elétricos e eletrônicos, hidráulicos e accionados mecanicamente, testes extensivos geralmente são realizados em ambiente de voo simulado [7].

Os vários subconjuntos são então levados para a linha de montagem principal, onde ocorre a integração final. Isso requer uma instalação equipada com uma rede de trilhos suspensos sobre os quais operam guindastres de elevação capazes de mover grandes porções da planície; o tamanho da instalação é regido pelas dimensões da aeronave [7]. A montagem da aeronave geralmente começa com a junção ou dos subconjuntos da fuselagem que foram accionados num gabarito de suporte. À medida que o veículo é montado, ele é movido por uma sucessão de estações de trabalho, adquirindo subconjuntos adicionais e acumulando os seus sistemas de bordo, cabos de controlo e outros encanamentos internos. As principais etapas de montagem incluem a adição de seções de nariz e cauda, asas, motores e trem de pouso. Na última estação, o avião é transportado da planta de montagem para a linha de voo para um teste de voo de produção, um processo que envolve uma verificação completa do desempenho especificado [7]. A seguir, é apresentada uma etapa crítica de verificação para cada aeronave, uma vez montada, para garantir a qualidade dos processos de fabricação e montagem. Isso envolve inspeções extensivas de itens estruturais e mecânicos, incluindo verificação funcional de equipamentos como superfícies e sistemas de controlo, operação de trem de pouso, desempenho aviônico e condicionamento ambiental da tripulação e passageiros [7].

4.4 PROCESSOS DE FABRICAÇÃO AVANÇADOS NA INDÚSTRIA DE AERONAVES

Nos últimos anos, a indústria aeroespacial viu inúmeras inovações acontecer, com o desenvolvimento de tecnologias emergentes e processos de fabricação inovadores. A construção de aeronaves requer processos de fabricação e técnicas de montagem de ponta para obter melhor qualidade de construção e maior taxa de produção [28]. A fabricação no setor aeroespacial envolve a montagem de componentes com grandes dimensões e formas que causam deformações significativas com o seu próprio peso. Portanto, as tolerâncias da interface física de peça para peça diferem das estimadas durante o processo de projeto [30]. Os processos e tecnologias avançados de fabricação simplificam os processos de produção, melhoram a taxa de produção, a qualidade e a repetibilidade e reduzem a rejeição por meio da automação. São aplicados tanto no desenvolvimento de protótipos quanto na produção em série [28].

4.4.1 Hidroformação de peças de chapa metálica

Enquanto o desempenho da aeronave é gerido pelo seu contorno aerodinâmico, alcançar um perfil de contorno complexo é um desafio [28]. A conformação de chapa é tradicionalmente usada para modelar vários componentes da estrutura da aeronave: a peça é moldada permanentemente para atingir a geometria necessária por meio de deformação mecânica, sem adicionar ou remover material durante o processo [31]. A deformação pode ser imposta mecanicamente (a dobra e a formação de matriz são as tecnologias mais comuns na fabricação

de aeronaves) ou manualmente (usando processos de almofada de borracha ou martelo de queda). Todas as peças da aeronave são posteriormente submetidas a inspeção para detecção de eventuais rugas, variação de espessura e falhas [7]. Considerando a complexidade do contorno e as limitações dos processos de conformação de chapas, os projetistas consideram a filosofia do projeto dividido, abordando geometrias complexas através da produção de peças projetadas individualmente. Isso leva ao aumento do número de peças e ferramentas e ao aumento do custo e do tempo de fabricação. A divisão resulta em mais articulações, exigindo mais rebites e subsequente aumento no peso total.

As questões descritas podem ser evitadas pelo uso da hidroformação, um processo que foi desenvolvido principalmente para as necessidades da indústria aeronáutica e aeroespacial [32]. A hidroformação é uma variação do processo de formação de matriz que utiliza um fluido hidráulico sob pressão ultra-alta para forçar o material de trabalho a uma matriz com a forma desejada, à temperatura ambiente. É classificado em processos de hidroformação em chapa e hidroformação em tubo [32]. A hidroformação de chapas usa uma matriz e uma folha de metal, que é introduzida na matriz por água de alta pressão num lado da chapa, formando a forma desejada (Figura 50). A hidroformação de tubos é uma expansão de tubos de metal numa forma usando duas metades de matriz, que contêm o tubo bruto. A hidroformação permite a formação de formas complexas com concavidades, o que seria difícil ou impossível nos processos de formação padrão [7,28,32]. É capaz de produzir peças com rigorosos requisitos de tolerância e permite um acabamento mais suave, pois as marcas resultantes das ferramentas de modelagem são eliminadas [7]. Esse processo é ideal para prototipagem e produção de baixo volume de alumínio, titânio, aço inoxidável e outras ligas aeroespaciais dúcteis, e também de painéis de metal composto [32].

4.4.2 Maquinação de alta velocidade de componentes longos

Componentes longos e delgados em aeronaves (como longarinas e ferrões) são usinados a partir de tarugos, envolvendo a remoção de quantidades consideráveis de material [7]. A maquinação em alta velocidade é adequada para maquinação em paredes finas [7,33]. Consiste numa operação ou uma combinação de operações em que a maquinação ocorre a alta velocidade de corte, alta velocidade do fuso, alta taxa de avanço e alta taxa de remoção [33].

Além de proporcionar maior taxa de remoção de metal, garante alimentação com baixa profundidade de corte, rápida dissipação de calor devido à remoção mais rápida de cavacos, melhor acabamento da superfície, menor deflexão de paredes finas devido à força de corte reduzida, menor empenamento e componentes praticamente sem stress, e melhor acabamento superficial e precisão dimensional [33]. Comparado à maquinação convencional, a maquinação em alta velocidade permite aumentar a eficiência, a precisão e a qualidade das peças, e ao mesmo tempo diminuir os custos e o tempo de maquinação [33].

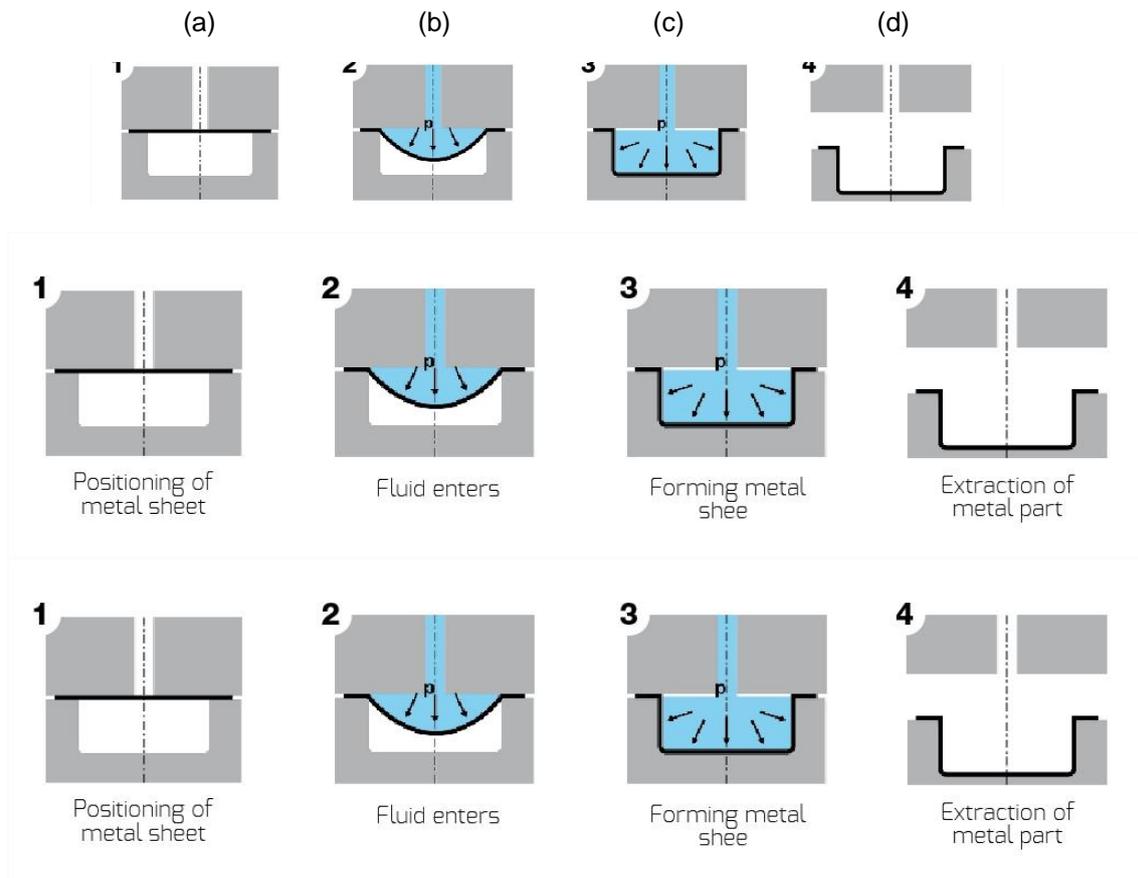


Figura 50. Representação esquemática da hidroformação de chapa metálica: (a) posicionamento da chapa metálica; (b) entrada de fluido; (c) modelagem de metal contra a matriz; (d) extração da parte metálica formada após a remoção do fluido.

4.4.3 Dobragem de tubos CNC

Os conjuntos de tubos rígidos são amplamente utilizados em sistemas de fluidos de aeronaves para transferir óleo, combustível e ar por toda a estrutura e motores. São produzidos numa variedade de ligas de aço inoxidável, alumínio, titânio e alta temperatura e a maioria ainda é fabricada por meio de dobragem e soldagem manual de tubos, resultando em qualidade insuficiente [28]. Além disso, tubulações com várias dobras não podem ser dobradas com um único tubo: o componente deve ser dividido em várias peças que são dobradas individualmente e depois unidas por soldagem; as juntas soldadas da tubulação resultam em distorção do tubo, propensas a trincas no local da junta e difíceis de obter permutabilidade [28].

A dobra CNC de tubos para tubulações e condutas do sistema está a ser introduzida atualmente na indústria aeronáutica [28]. O tubo é posicionado entre duas matrizes e uma força mecânica é aplicada para empurrar o material, forçando-o a adaptar-se à forma da matriz. O tubo de estoque é mantido firmemente no lugar e a extremidade é girada e enrolada em torno da matriz, enquanto um mandril é colocado dentro para impedir que ela desmorone durante a flexão [28]. Comparativamente com a dobragem manual de tubo convencional, a dobragem CNC resulta em melhor precisão e repetibilidade, menos intervenção humana / baixo conjunto de

competências, maior grau de controlo, flexibilidade e velocidade de troca e a possibilidade de produzir raios e ângulos de curvatura complexos [28].



Figura 51. Dobragem de tubos de metal CNC.

4.4.4 EDM de várias passagens de componentes complexos

A maquinação por descarga elétrica (EDM) é um processo de fabricação em que a forma desejada é obtida removendo o material da peça de trabalho por uma série de descargas elétricas recorrentes rapidamente (faíscas) entre dois eletrodos [31]. Dois fatores principais têm contribuído para afirmar o EDM como um processo de produção viável na indústria aeronáutica [34]. Primeiro, o requisito da indústria para a fabricação de alto volume de componentes de precisão usando materiais incomuns, como superligas de níquel e ligas de titânio, difíceis de usinar pelos métodos convencionais de corte de metal [34]. Em segundo lugar, o desenvolvimento de sistemas inovadores avançados, que oferecem a capacidade de alta produtividade, com economia no espaço e mão de obra [28,34]. Em particular, o controlo numérico por computador dos parâmetros de descarga e dispositivos de detecção precisos fornecem os meios para automatizar completamente os ciclos de maquinação [34], tornando-o um processo mais estável e previsível [28].

Na indústria aeronáutica, o EDM é particularmente adequado para maquinação de contornos e cavidades complexos, furação de longo aspecto, corte de perfil complexo e ranhuras através de corte, que tradicionalmente exigiriam ferramentas complexas e caras, grandes tempos de ciclo para configuração e maquinação e, finalmente, resultando num processo caro [28]. O EDM é inestimável para atender a uma necessidade específica da indústria: perfurar um grande número de furos pequenos, nem sempre circulares (geralmente milhares) num único componente. Usando maquinação convencional, a ruptura da broca é inaceitavelmente alta e, quando o furo precisa estar num ângulo agudo com a superfície, a perfuração é praticamente impossível [34]. O EDM não resolveu apenas o problema, mas também resultou em altas taxas de produção para componentes de precisão [28,34].

4.4.5 Maquinação multitarefa

Após o advento do CNC na década de 1960, as fresadoras evoluíram para centros de maquinação: fresadoras aumentadas por trocadores de ferramentas automáticos, porta-ferramentas, capacidade CNC, sistemas de refrigeração e gabinetes [31]. Essas máquinas multitarefas (MTM) permitem integrar diferentes famílias de operações - por exemplo, torneamento, fresagem, retificação, inspeção - dentro do mesmo envelope de trabalho numa única instalação, sem intervenção manual [28]. Há muitas vantagens na multitarefa, pois oferece economias consideráveis: a combinação de operações pode reduzir drasticamente a configuração e outro tempo sem valor agregado, melhorando o processo e o tempo de ciclo para produzir uma peça completa; também reduz as oportunidades de erro e elimina o

inventário de trabalho em processo que geralmente permanece entre as máquinas-ferramentas independentes [28].

4.4.6 Disposição automatizada de peças compostas

A fabricação de compósitos requer a colocação do reforço de fibra no local. Isso envolve o estabelecimento de fibras de reforço ao longo de trajetórias predefinidas no componente, com o objetivo de maximizar o desempenho de uma peça em particular, usando a força altamente direcional do reforço de fibra (por exemplo, para melhorar a rigidez e resistência dos componentes ou para reforçar localmente furos e recortes) [35]. A disposição manual de reforços de fibra pré-impregnada tem sido um padrão nos processos de fabricação de compósitos aeroespaciais. Isso adequou-se aos volumes de construção relativamente baixos da indústria, enquanto o requisito de inspeção de 100% imposto pelos fabricantes de equipamentos originais aeroespaciais garante que qualquer erro introduzido por humanos durante a colocação manual seja mais provavelmente identificado e corrigido antes da entrega ao cliente [36]. No entanto, a definição de "alto volume" na indústria aeronáutica está a aumentar, pressionando os fabricantes de compósitos a serem mais rápidos e eficientes. A automação está a evoluir para enfrentar esse desafio [37] e a colocação automatizada de fibras (AFP) e a colocação automatizada de fitas (ATL) atualmente permitem automatizar a colocação: são os processos de fabricação que permitiram a aplicação generalizada de compósitos no Boeing 787 e Airbus A350 [37]

A colocação automatizada de fita é uma técnica de fabricação automatizada bem estabelecida para formar layouts compostos. Fitas unidirecionais amplas são colocadas num molde de peça usando um sistema de roletes carregado com diferentes graus de articulação, dependendo da complexidade da peça que está a ser fabricada. O ATL essencialmente replica a deposição manual de fita unidirecional, mas pode fazê-lo em velocidades mais altas, em peças maiores, com maior controlo do processo com controlo preciso do início, corte e orientação da fita [35]. O processo automatizado de colocação de fibra (Figura 52a) envolve a colocação de pré-impregnado controlado por computador, permitindo a produção altamente automatizada e de alta velocidade de laminados com dupla curvatura [35]. Os prepregs unidirecionais amplos são colocados e compactados num molde de peça usando um sistema de rolos carregados com graus variados de articulação, dependendo da complexidade da peça que está a ser fabricada. Um aspecto importante é a capacidade de permitir que fitas individuais na banda sejam paradas, cortadas e reiniciadas durante o processo de colocação. Como resultado, é possível fazer janelas recortadas, colocar vários tamanhos de dobradores de lona com precisão de tolerância estreita nos limites da lona e estabelecer uma espessura constante da lona em formas cónicas. Também é possível colocar chapas em qualquer orientação (Figura 52b), e várias máquinas atualmente disponíveis farão a disposição bidirecional simultânea do material [35]. Essa tecnologia permite melhor precisão e maiores taxas de deposição quando comparada com os trabalhadores experientes em laminadoras, mas, embora permita geometrias de disposição mais complexas que a ATL, não atinge as mesmas taxas de deposição [35]. A colocação automatizada de fibras pode ser usada para fabricar estruturas complexas que não são possíveis de serem fabricadas com outros métodos [29,35].

Apesar de suas vantagens de produtividade, essas tecnologias não são económicas ou eficientes para todas as operações de posicionamento pré-impregnado, particularmente para peças com peças trefiladas e altamente contornadas, onde os dedos humanos são tão capazes [37]. Isso significa que a tecnologia de automação deve ser desenvolvida para atender aos requisitos de qualidade e taxa de produção das aeronaves da próxima geração [37]. Assim, reivindicações

adicionais pela indústria aeronáutica são aprimoradas e o progresso de ambas as técnicas, incluindo o aumento da velocidade de assentamento, a aderência da superfície do molde, o aumento da força aplicada pelo sistema robótico, a otimização da geometria do modelo final e vários robôs [36,37].



Figura 52. Colocação automatizada de fibras [35]: (a) exemplo de equipamento comercial (MTorres Machine Company, Espanha); (b) AFP robótico em várias orientações (Coriolis Composites, França).

4.4.7 Maquinação CNC de peças compostas

Os plásticos reforçados com fibra têm alta resistência específica, alta rigidez e boa estabilidade dimensional. Essa combinação de propriedades é incomum e não é facilmente obtida em ligas metálicas. No cenário atual da aeronave, a maioria da pele e mastros foram substituídos por peças compostas reforçadas com fibra de carbono, com considerável redução na contagem e no peso de peças [28]. As peças compostas são processadas através da disposição manual de pré-impregnados num molde com geometria desejada e curadas principalmente através do processo de autoclave. No entanto, certos procedimentos de maquinação, como fresagem e furação, são necessários para obter ajustes e tolerâncias apertadas, além de obter formas quase líquidas e espessura uniforme nos processos de produção clássicos. Os procedimentos manuais estão a ser substituídos pela maquinação, usando o controlo numérico computadorizado (CNC) dos compósitos, que fornece melhor controlo de espessura e tamanho, melhorando a construção da aeronave [7].

4.4.8 Fabricação aditiva

A manufatura aditiva (AM) abrange uma variedade de processos nos quais o material é unido ou solidificado sob controlo de computador para criar um objeto tridimensional, com o material sendo adicionado camada por camada [38]. Tal difere dos processos convencionais de

maquinação, fundição e forjagem, em que o material é removido de um item de estoque ou derramado num molde e modelado por meio de matrizes, prensas e martelos [38].

O processo genérico de AM envolve sete etapas [38]. (i) CAD: Todas as peças AM partem de um modelo de software que descreve completamente a geometria externa do sólido 3D. (ii) Conversão de arquivo: o arquivo CAD é convertido para o formato de arquivo STL (ou similar), que descreve as superfícies externas fechadas do modelo CAD original e forma a base para o cálculo das fatias. (iii) Transferência para máquina AM e manipulação de arquivo STL: correções de tamanho, posição e orientação para a construção. (iv) Configuração da máquina AM: definição de parâmetros operacionais, como restrições de materiais, fonte de energia, espessura da camada e tempos. (v) Construção: a construção da peça é um processo automatizado. (vi) remoção. (vii) Pós-processamento: as peças podem exigir a remoção de estruturas de suporte, limpeza adicional e / ou qualquer forma de tratamento de superfície antes de estarem prontas para uso.

As tecnologias de fabricação aditiva apresentam vantagens únicas que estão a revolucionar o desenvolvimento e a fabricação de produtos. Uma das suas principais vantagens é a capacidade de produzir e / ou integrar geometrias complexas, permitindo a produção de peças personalizadas em pequenas séries e económicas. Outros benefícios incluem menor tempo de processamento e menor tempo de colocação no mercado, menor consumo de matérias-primas e consumíveis, menos etapas de produção e adequação para produzir formas muito pequenas e complexas. Uma ampla gama de polímeros, compósitos poliméricos, metais e cerâmica foi demonstrada, mas apenas um subconjunto deles está disponível comercialmente; outras preocupações envolvem propriedades mecânicas intrinsecamente baixas resultantes de um acabamento superficial com pouca qualidade comparado às tecnologias convencionais [38,39]. As tecnologias aditivas podem ser classificadas em três categorias em relação à forma inicial da matéria-prima [38] (Tabela 9): à base de líquido, incluindo fotopolimerização em cubas e jateamento de material; à base de sólidos, incluindo extrusão de material e laminação de folhas; e à base de pó, nomeadamente jateamento de aglomerados, fusão de leito de pó e deposição direta de energia.

Tabela 9. Materiais para tecnologias AM (adaptados de [38]).

Tecnologia	Materiais			
	Estado inicial	plásticos	metais	cerâmicas
<i>fotopolimerização de cuba</i>	líquido	✓	x	x
<i>jateamento de material</i>		(fotossensível)		
<i>extrusão de material</i>	sólido	✓	x	✓
<i>laminação de folhas</i>		✓	✓	✓
<i>jateamento</i>	pó	✓	x	✓
<i>fusão de cama em pó</i>		✓	✓	✓
<i>fusão de cama em pó</i>		✓	✓	✓

Fotopolimerização Vat. Nos processos de fotopolimerização, uma cuba de polímero líquido é exposta à iluminação controlada sob condições de luz de segurança [38]. O fotopolímero líquido exposto endurece por meio de reticulação mediada pelos grupos cromóforos, que reagem com a solução para iniciar a polimerização. A polimerização de monómeros leva à reticulação, o que cria um polímero. Após o término de uma camada, a placa de construção move-se verticalmente em pequenos incrementos e o polímero líquido é novamente exposto à luz. O processo repete-se até que a peça seja concluída. O polímero líquido é então drenado da cuba, deixando o modelo sólido [38]. Tanto a estereolitografia (SLA) quanto o processamento de luz digital (DLP) enquadram-se na categoria de polimerização em tanque da impressão 3D. No entanto, uma diferença importante entre as duas tecnologias é o tipo de fonte de luz usada para solidificar o

material: o SLA usa feixe de laser ultravioleta (UV) ou de luz visível (Figura 53a) e o feixe move-se de ponto a ponto numa camada de resina, passando para outra camada após a cura da camada anterior; no DLP, uma tela do projetor de luz digital permanece estacionária para exibir uma imagem de cada camada de uma só vez, curando uma camada completa de resina de cada vez (Figura 53b). Portanto, o DLP normalmente é um processo mais rápido que o SLA, mas como o projetor de luz digital fornece luz em pixels, resulta numa forma pixelizada projetada na resina que evita bordas suaves. Como o endurecimento da resina no SLA é feito de um ponto a outro, é mais preciso e a qualidade da impressão é melhor em comparação com o DLP. O jato de material (MJ) opera de forma semelhante às impressoras 2D: um cabeçote de impressão (semelhante aos cabeçotes de impressão usados na impressão a jato de tinta padrão) distribui gotículas de material fotossensível de maneira linear. Depois de toda a camada ser solidificada sob luz UV, a plataforma de construção move-se para baixo e o processo repete-se até que toda a peça esteja concluída. A possibilidade de conectar vários cabeçotes de impressão a jato de tinta permite que diferentes cabeças dispensem materiais diferentes, de modo que a impressão de vários materiais e a impressão em cores são diretas e amplamente utilizadas. As principais desvantagens do MJ incluem que a resina líquida deve ser aquecida a 30-60 °C para alcançar a viscosidade ideal para impressão, e que as estruturas de suporte são sempre necessárias e precisam que o pós-processamento seja removido; todo o processo de polimerização em tanque é limitado pela exigência de processar resinas fotossensíveis [38].

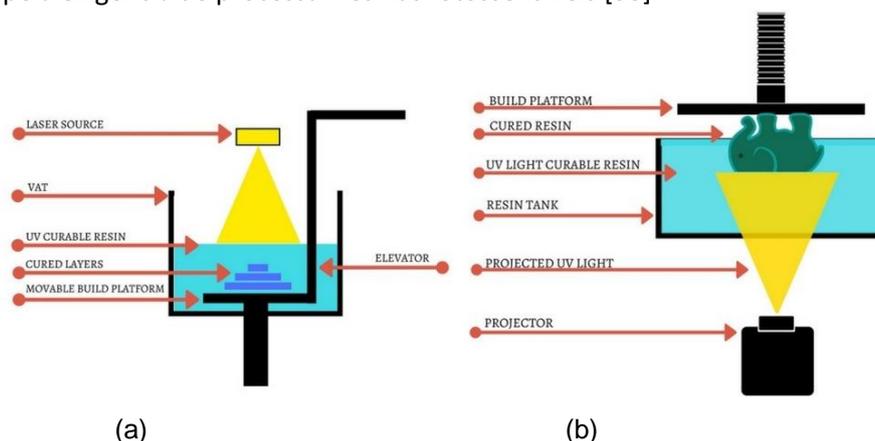


Figura 53. Diagrama esquemático dos processos de polimerização em cubas: (a) SLA; (b) DLP (créditos de imagem: 3DMag).

Extrusão de material. Atualmente, é a tecnologia mais popular do mercado [38]. A pressão é aplicada para desenhar o material através de um bico, onde é aquecido e, em seguida, é depositado camada por camada. O bico pode mover-se horizontalmente e uma plataforma move-se para cima e para baixo na vertical depois de cada nova camada ser depositada [38]. A pressão aplicada deve ser mantida estável e em velocidade constante para permitir resultados precisos em relação ao diâmetro da seção transversal. A camada a seguir é adicionada sobre a anterior. As camadas de material podem ser ligadas pelo controlo de temperatura (as camadas são fundidas após a deposição, pois o material está no estado derretido) ou pelo uso de agentes químicos [38]. O material é frequentemente adicionado à máquina na forma de filamento (Figura 55). Embora essa tecnologia seja usada principalmente para plásticos, também pode ser usada para metais e cerâmica (Tabela 9). Nesse caso, os materiais de alimentação são misturas de um aglutinante polimérico (de 40% a 60% em volume) e um pó sólido de grão fino de metal ou material cerâmico. No entanto, a extrusão de plásticos é muito mais comum, sob a técnica de fabricação de filamentos fundidos (FFF), responsável por quase 50% de todas as AM [38].

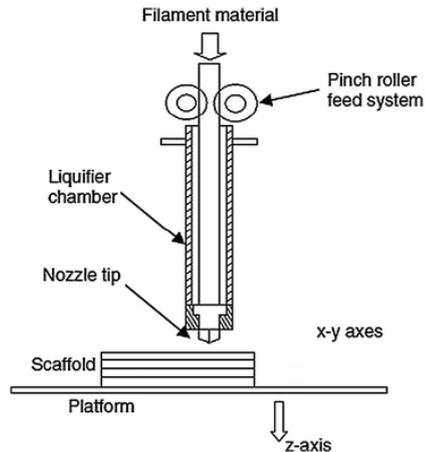


Figura 54. Representação esquemática da técnica FFF de extrusão de filamentos plásticos [38].

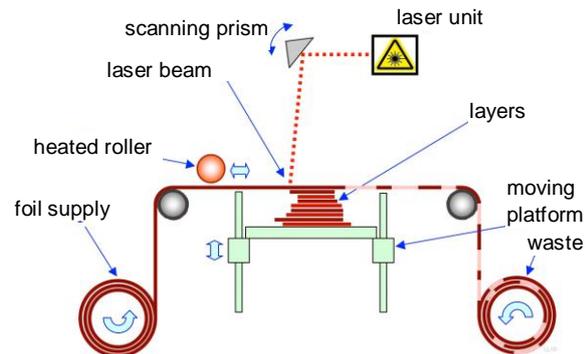


Figura 55. Representação esquemática do processo de laminação de chapas LOM (créditos de imagem: wikipedia).

Laminação de folhas. Nesta tecnologia, conhecida como fabricação de objetos laminados (LOM), camadas de papel, plástico, cerâmica ou laminados metálicos são sucessivamente unidos e cortados para moldar com um cortador a laser [38]. Cada folha representa uma camada seccional do modelo CAD da peça. Devido ao princípio de construção, apenas os contornos externos da peça são cortados, e as folhas podem ser cortadas e depois empilhadas, ou empilhadas e depois cortadas. O mecanismo utilizado para obter a ligação entre as camadas pode ser ligação adesiva (colagem), ligação térmica, fixação ou soldagem por ultrassom [38].

Jateamento de ligantes. O jateamento de ligantes é a tecnologia AM que corresponde adequadamente à expressão impressão 3D. Um encadernador é impresso numa cama de força para formar seções transversais. Somente uma pequena porção do material da peça é entregue através da cabeça de impressão; a maior parte do material da peça é composta de pó no leito de pó [38]. Tipicamente, as gotículas de ligante formam aglomerados esféricos de líquido ligante e partículas de pó, fornecendo ligação à camada impressa anteriormente. Depois de uma camada ser impressa, o leito de pó é reduzido e uma nova camada de pó é espalhada sobre ele (geralmente por meio de um mecanismo de rotação contra-rotação). Este processo é repetido até que a peça seja concluída [38].

Fusão em pó. A sinterização seletiva a laser (SLS) foi o primeiro processo de fusão do leito de pó comercializado (PBF) (Figura 56) e todos os outros procedimentos de PBF - por exemplo, sinterização direta a laser de metal (DMLS), fusão a laser seletiva (SLM) e fusão por feixe de elétrons (EBM) - modifique a sua abordagem básica de uma ou mais formas para aumentar a produtividade da máquina, permitir que diferentes materiais sejam processados e / ou evitar recursos patenteados específicos [38]. No entanto, o conjunto básico de características é o mesmo. A abordagem consiste na fusão seletiva de materiais num leito granular, fundindo apenas as regiões prescritas de cada camada; a área de trabalho então move-se para cima, adicionando outra camada de grânulos e repetindo o processo até a peça se acumular; é necessário um mecanismo para suavizar as camadas de pó [38]. Geralmente, é necessário um período de resfriamento para permitir que as peças esfriem uniformemente até a temperatura ambiente antes do manuseio.

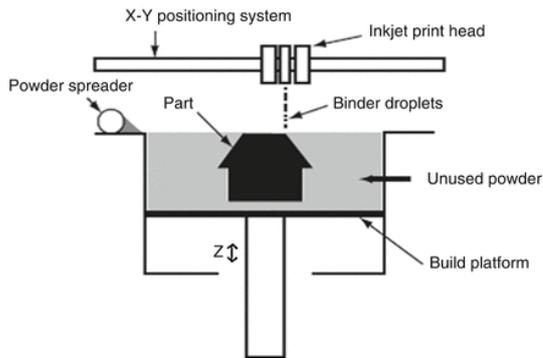


Figura 56. Diagrama esquemático do processo de jateamento de aglutinantes [38].

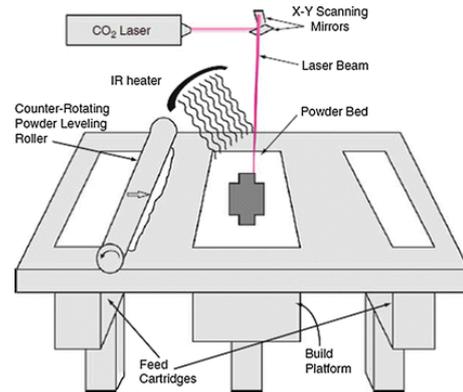


Figura 57. Diagrama esquemático do processo SLS em pó [38].

Deposição de energia dirigida. Os processos de deposição de energia direcionada (DED) (Figura 58) permitem a criação de peças por meio da fusão do material à medida que ele é depositado [38]. Uma fonte de calor (normalmente um laser ou feixe de elétrons) é usada para aquecer e derreter o material do substrato e, simultaneamente, derrete o material que está a ser depositado na piscina de fusão do substrato. Cada passagem da cabeça do DED cria uma trilha de material solidificado, e as linhas adjacentes de material formam camadas e constroem objetos tridimensionais de forma semelhante aos processos baseados em extrusão descritos anteriormente [38]. De forma diferente das técnicas de fusão do leito de pó, os processos DED não são usados para derreter um material pré-assentado num leito de pó, mas são usados para derreter materiais à medida que estão a ser depositados [38]. Embora essa abordagem possa funcionar com polímeros, cerâmicas e compósitos com matriz de metal, ela é predominantemente usada para pós de metal (Tabela 1), e essa tecnologia é frequentemente designada por deposição de metal.

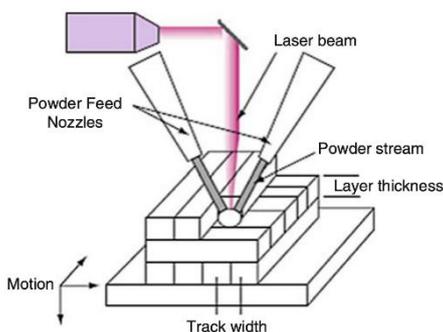


Figura 58. Diagrama esquemático do procedimento DED [38].

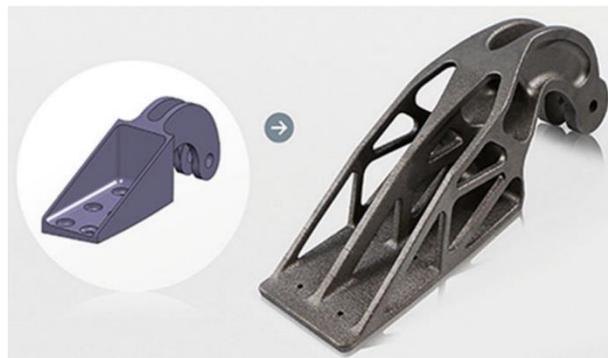


Figura 59. Suporte de dobradiça de nacele A320 reprojetoado para AM [38].

AM na indústria aeronáutica. O AM foi aplicado em aeronaves desde que foi introduzido pela primeira vez na década de 1980 [38], devido à janela de oportunidade que se abre com relação a vários recursos e necessidades da indústria. Uma dessas características é a geometria complexa das aplicações da aeronave, exigindo frequentemente que os componentes tenham

mais de uma função (por exemplo, as pás da turbina do motor também podem ter uma estrutura interna para passar o líquido de arrefecimento). Isso pode ser resolvido pela capacidade da AM de gerar geometrias complexas projetadas com um número limitado de etapas de processamento [38]. Além disso, a AM oferece a oportunidade de repensar completamente como os componentes são modelados para melhor desempenhar as suas funções: projetos integrados podem ser produzidos que combinam várias peças, eliminam operações de montagem, melhoram o desempenho projetando peças para utilizar o material com eficiência, eliminam os compromissos de forma causados por limitações de fabricação e possibilita a produção completa de novos estilos de produtos [38]. A Figura 4.10 mostra o exemplo do suporte para dobradiça de nacele A320: o novo design otimizado possibilitado pela AM resultou numa redução de 64% no peso parcial, permitindo economizar um total de 10 kg por avião, o que resulta numa redução de cerca de 40% nas emissões de carbono ao considerar o número total de aviões A320 produzidos até agora [39]. A AM também trabalha em relação ao requisito leve das estruturas de aeronaves. Isso pode ser conseguido com o uso de materiais de baixa densidade com alta relação resistência / peso, como é o caso de ligas de titânio, ligas de alumínio e materiais compósitos (§ Módulo 2). Mas isso também pode ser resolvido através da criação de estruturas leves com núcleos internos ocos ou favo de mel, que é o tipo de otimização de topologia bastante fácil de obter usando AM [38]. O AM permite economia de custos, pois é particularmente qualificado para a produção económica de pequenas séries, que são comuns em aeronaves, uma vez que não são necessárias ferramentas duras. Isso dispensa o projeto e a fabricação de moldes, matrizes e acessórios e evita o tempo gasto no planeamento de processos complexos exigido pelos processos de fabricação convencionais [38]. As tecnologias AM também permitem que as empresas mantenham modelos digitais de peças, que são muito mais fáceis e menos dispendiosas do que armazenar peças ou ferramentas físicas durante toda a vida útil da aeronave (20 a 50 anos ou mais) [38].

Em resumo, as vantagens da abordagem AM sobre os processos de fabricação convencionais das aeronaves incluem um design mais compacto, redução de peso e recursos integrais [38]. Segundo relatos, 200 partes estão a voar em pelo menos oito diferentes militares e oito diferentes modelos civis de aeronaves [38,39]. Até recentemente, todas eram peças de polímeros não estruturais: as peças de polímeros para aeronaves precisam de corresponder aos requisitos de inflamabilidade; portanto, a sua adoção precisava de esperar até que os materiais de polímeros retardadores de chama fossem desenvolvidos. Para metais, a qualificação do material e a certificação de peças levaram muitos anos para serem alcançadas. Além da fabricação de peças, as empresas aeroespaciais também estão a desenvolver novos materiais de alto desempenho em metais e polímeros, além de métodos de processamento [38,39]. Algumas das primeiras aplicações de fabricação de produção de peças metálicas em larga escala estão a surgir na indústria aeroespacial. Novos conceitos de projeto podem ser esperados não apenas para peças, mas para módulos inteiros. Além disso, os fornecedores de AM estão a desenvolver máquinas de estrutura maiores para que peças maiores possam ser fabricadas, abrindo novas oportunidades para componentes estruturais de metal e peças funcionais de polímero [38]. Em muitos casos, pode esperar-se muito mais aplicações de produção de AM em aeronaves no futuro próximo, à medida que o material avança e os métodos de produção se tornam padronizados, repetíveis e certificados.

5 DESENHO TÉCNICO

O desenho é uma forma de arte visual na qual um instrumento é usado para marcar papel ou outro meio bidimensional deixando sinais visíveis, permanentes ou temporários. O desenho tem sido um meio de expressão popular e fundamental ao longo da história da humanidade e é um dos recursos mais simples e eficientes para a comunicação de ideias [40].

5.1 DESENHO TÉCNICO COM UMA FERRAMENTA DE COMUNICAÇÃO

Desenho Técnico é o ato de compor imagens que transmitem visualmente como algo funciona ou é construído, essencial para a comunicação de ideias na indústria e em engenharia. A necessidade de comunicação precisa na preparação de um documento funcional distingue o desenho técnico do desenho artístico. Os desenhos artísticos são subjetivamente interpretados e os seus significados são múltiplos. Os desenhos técnicos por seu lado têm um significado específico e capturam com precisão e sem ambiguidade todas as características geométricas (forma e dimensão) de um produto ou componente. O objetivo final de um desenho de engenharia é transmitir todas as informações necessárias que permitirão ao fabricante produzir esse componente [40].

Para facilitar a compreensão de um desenho técnico, o desenhador usa símbolos, perspectivas, unidades de medida, sistemas de notação, estilos visuais e layout de página bem conhecidos. Juntas, essas convenções constituem uma linguagem visual que ajuda a garantir que o desenho é inequívoco e relativamente fácil de entender. Muitos dos símbolos e princípios do desenho técnico são especificados na norma internacional ISO 128 (§ Module 5.4).

O desenho técnico tornou-se gradualmente mais preciso e rigoroso ao longo do tempo, em estreita relação com a evolução dos instrumentos utilizados na sua execução [40]. O desenho técnico manual requer uma prancha, uma régua em T e uma caneta técnica, além do domínio do desenho de linhas, arcos, círculos e texto numa folha de papel. Também requer uma compreensão completa de geometria e trigonometria, compreensão espacial, precisão, exatidão e atenção aos detalhes. Durante séculos, até a Segunda Guerra Mundial, todos os desenhos de engenharia eram feitos manualmente, usando lápis ou caneta sobre papel. Nos anos 80, as tarefas associadas ao desenho mecânico foram amplamente automatizadas e aceleradas através do uso de sistemas de desenho auxiliado por computador (CAD) na representação de projeções ortográficas (CAD) (§ Modulo 5.4.1). Na década de 1990, os sistemas CAD evoluíram para uma nova filosofia baseada na representação paramétrica de modelos tridimensionais. Isto significa que todas as informações sobre peças individuais e montagem de peças são mantidas, com restrições geométricas ou dimensionais; se alguma das restrições for alterada, o desenho paramétrico atualiza-se automaticamente [40]. Os modelos paramétricos permitem gerar representações 2D ou 3D, facilitando a obtenção de imagens detalhadas das peças em qualquer posição, sem aumentar as horas de desenho [40]. A maioria dos desenhos de engenharia é atualmente feita em CAD, embora lápis e papel não tenham desaparecido completamente.

5.2 . INFORMAÇÃO CONTIDA NOS DESENHOS TÉCNICOS

Os desenhos técnicos pretendem representar produtos e componentes com precisão e sem ambiguidade. Em aeronáutica, eles são a melhor ferramenta de comunicação entre os

engenheiros de projeto e os trabalhadores que constroem, mantêm e reparam uma aeronave. Para esse fim, existem várias técnicas de representação, dependendo da finalidade para a qual o desenho é usado. O mais comum para fins de fabrico e montagem é o sistema de projeção de vistas múltiplas, que inclui informações sobre todo o componente (desenhos de montagem) e uma lista de materiais (Bill of Materials, BOM) (§ Module 5.5.6) associada. Na BOM encontram-se os desenhos detalhando cada peça ou montagem, identificando todos os detalhes da geometria e outras informações necessárias para a produzir com precisão, incluindo: condição da superfície (pintura ou outros tratamentos de superfície); todas as dimensões e tolerâncias dimensionais e geométricas correspondentes (para garantir que o tamanho e a forma da peça estão corretos dentro de certos limites); todos os processos necessários, incluindo soldadura, fixação, rebiteagem; e todas as anotações necessárias para o entendimento completo da peça. Para outros fins, incluindo a representação do sistema elétrico ou do sistema de condutas, os desenhos podem ser mais esquemáticos, desde que incluam todas as informações para montar o equipamento. Representações em perspectiva também são comuns a acompanhar um texto explicativo (por exemplo, mostrando como executar um procedimento nos manuais de operação ou de manutenção).

5.3 DEVOLVIMENTO DE PRODUTO

O desenvolvimento de um produto segue uma série de etapas, desde o conceito ou ideia até à utilização. O desenvolvimento de componentes aeronáuticos passa geralmente pelas etapas de conceito, projeto preliminar, desenvolvimento, produção e certificação. Os marcos associados a estas etapas incluem a Revisão do Conceito (que se concentra nas metas, definição de requisitos, conceitos, viabilidade, e cronograma e orçamento gerais do projeto), a Revisão Preliminar (na qual o design inicial de subsistemas, interfaces e itens de configuração é revisto considerando os requisitos do projeto) e a Revisão Crítica (uma revisão técnica multidisciplinar para garantir que o sistema pode prosseguir para fabrico, demonstração e teste, e que pode atender aos requisitos de desempenho relativos a custo, cronograma e risco). A produção pode depois iniciar-se, no âmbito do marco de Revisão da Produção. Finalmente tem lugar a First Article Inspection (inspeção do primeiro artigo produzido), que faz parte dos requisitos de controle de compra e design, onde o fornecedor e o comprador se asseguram que o processo de produção resulta num componente com os requisitos contratados.

5.4 NORMALIZAÇÃO

Todos os elementos de desenho estão sujeitos a normalização, isto é, a especificações que impõem os princípios gerais de apresentação e representação gráfica de objetos. Isto garante que os desenhos técnicos estão em conformidade com os padrões mínimos estabelecidos internacionalmente e são portanto confiáveis e comparáveis. Existem diferentes normas de desenho usadas na indústria, sendo as mais comuns as publicados pela International Organization for Standardization (ISO) (habituais na Europa) e pelo American National Standards Institute (ANSI) (nos EUA). A norma ISO 128 (em quinze partes) aborda as regras gerais para execução e estrutura de desenhos técnicos [42]. Além disso, descreve convenções básicas para linhas [43], vistas [44], cortes e seções [45] e diferentes tipos de desenhos de engenharia, incluindo engenharia mecânica [46, 47], arquitetura, engenharia civil e construção naval. É aplicável a desenho manual e em computador, mas não é aplicável a modelos CAD 3D [43]. Outras especificações internacionais importantes sobre desenho técnico referem-se ao tamanho de papel normalizado (ISO 216:2007) [48], dobragem (ISO 5457:1999) [49], letras (ISO

3098/1:1974) [50] e tolerâncias (ISO 129) [51]. Uma extensas listas de normas pode ser consultada na maioria dos livros sobre desenho técnico.

5.5 TIPOS DE REPRESENTAÇÃO

Projeções gráficas são métodos de desenho através dos quais a imagem de um objeto tridimensional é projetada numa superfície plana (como papel de desenho ou o ecrã do computador). Atualmente, com computadores e sistemas CAD avançados, alguns desenhos estão disponíveis apenas em formato digital (representação 3D), que inclui todas as informações técnicas contidas na representação. As projeções podem ser divididas em projeção paralela (o observador é colocado em uma posição infinita em relação ao objeto/plano) e projeção central (o observador é colocado em uma posição finita em relação ao objeto/plano) (§ Module 5.5.1 and 5.5.2) , que por sua vez pode ser perpendicular ou oblíquo ao plano de representação (§ Module 5.5.3).

Na maioria dos casos, uma única vista não é suficiente para mostrar todos os pormenores necessários e são usadas várias vistas [40]. A técnica de representação mais utilizada para fabrico e montagem de componentes é o sistema de projeção multivista. O objeto é projetado nas seis faces de um cubo, conforme observado por um observador posicionado perpendicularmente a cada um desses lados. Quando o cubo é "aberto", é criada uma representação plana. Isso corresponde a representar objetos tridimensionais em 2D, sendo todas as linhas de projeção perpendiculares ao plano de projeção. O posicionamento das vistas relativamente umas às outras é normalizado: na Europa utilizam-se as regras de projeção de primeiro ângulo, em que os projetores paralelos se originam por trás do observador e passam pelo objeto 3D para projetar uma imagem 2D ortogonal. O objeto 3D é projetado na superfície 2D como se o observador olhasse para uma radiografia do objeto: a vista superior está sob a vista frontal, a vista direita está à esquerda da vista frontal. Nem todas as vistas são obrigatoriamente usadas: somente as necessárias e suficientes para transmitir todas as informações necessárias de forma clara. As vistas frontal, de cima e lateral direita são geralmente consideradas as vistas incluídas por defeito, mas qualquer combinação pode ser usada dependendo das necessidades específicas. Além das seis vistas principais (frontal, traseira, superior, inferior, lado direito, lado esquerdo), quaisquer vistas auxiliares ou seções podem ser incluídas para servir aos propósitos de definição da peça e da sua comunicação.

Uma vista auxiliar é uma representação ortogonal projetada em qualquer plano que não seja uma das seis vistas principais. São geralmente usadas quando um objeto contém algum tipo de plano inclinado: o uso da vista auxiliar permite que o plano inclinado (e quaisquer outros pormenores significativos) seja projetado no seu tamanho e forma reais.

Um desenho em corte (§ Module 5.5.4) mostra uma vista da estrutura como se tivesse sido seccionada ao meio ou ao longo de outro plano imaginário. A vista em corte é aplicável a objetos em que os detalhes internos são complexos (Figura 60 a)) e que seriam muito difíceis de entender através do uso de linhas ocultas (Figura 60 b)) num desenho ortogonal. Isso pode ser contornado seccionando o objeto num plano (Figura 60 c)) e mostrando a vista interna resultante (Figura 60 d)), o que permite visualizar os detalhes internos da peça.

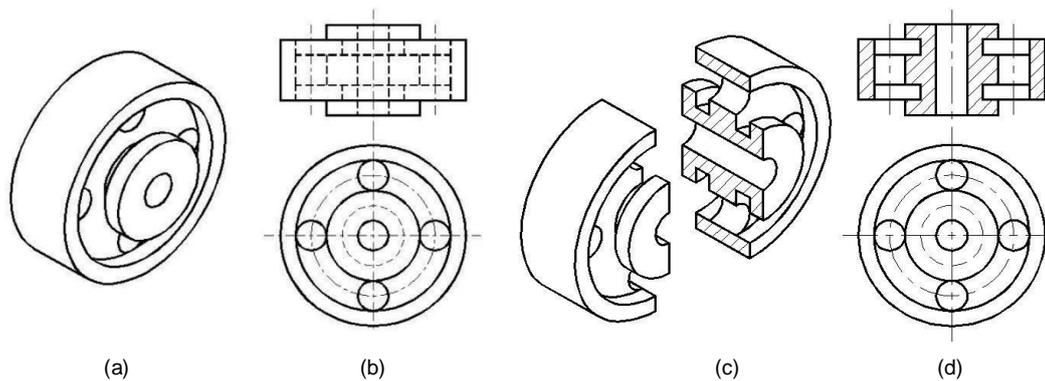


Figura 60. Vistas em corte: (a) peça complexa; (b) representação da peça usando vistas ortogonais convencionais; (c) plano de corte; (d) vista cortada mostrando detalhes internos da peça [40].

O corte pode ser feito de várias maneiras. Num corte total, a linha do plano de corte passa completamente pela peça. Geralmente, uma das vistas convencionais é substituída pela vista de seção completa correspondente. As superfícies mostradas no desenho do corte são aquelas partes que estiveram em contato direto com o plano de corte. Num meio corte, o plano de corte estende-se apenas na metade do objeto, deixando a outra metade como uma vista exterior [40]. Meios cortes são usados vantajosamente na representação de objetos simétricos para mostrar simultaneamente o interior e o exterior. Um corte removido desenhado diretamente na superfície externa mostra a forma da seção transversal de uma peça, ilustrando partes específicas do objeto [40]. Uma seção cortada faz parte de uma vista de desenho existente, usada para remover o material a uma profundidade especificada, a fim de expor os detalhes internos de um modelo [40].

Os desenhos de montagem detalham como certas peças são montadas para formar o componente. Geralmente incluem três vistas ortogonais do sistema, dimensões gerais, identificação e peso de todos os componentes, quantidades de material, detalhes do fornecimento, lista de desenhos de referência e notas. Um desenho de montagem também mostra em qual ordem o produto é montado, apresentando todas as peças como se se estivessem “esticadas”. Quando uma seção é representada numa montagem, diferentes traços são usadas para representar diferentes partes; elementos de ligação como parafusos, rebites ou eixos não são seccionados [40].

Um esboço é um desenho à mão livre, executado rapidamente, que geralmente não se destina a um trabalho final. É uma maneira rápida de registrar uma ideia para uso posterior, ou uma maneira de experimentar ideias diferentes antes de um trabalho mais finalizado, especialmente quando este é caro e demorado.

Outro tipo de representação, bastante frequente em diagramas, manuais e instruções de manutenção, é a representação isométrica (axonométrica) (§ Module 5.5.7 and 5.5.8). O desenho isométrico é o método mais utilizado para o desenho pictórico [40]. Uma vista isométrica é uma representação de um objeto que usa uma combinação das vistas ortográficas e as inclina para frente, de modo que partes das três possam ser vistas numa mesma imagem, fornecendo ao observador uma percepção 3D do objeto. Os desenhos isométricos são construídos em três linhas, chamadas eixos isométricos: um é desenhado verticalmente e os outros dois a 30° em relação à horizontal (o ângulo entre os eixos axonométricos é de 120°, Figura 61).

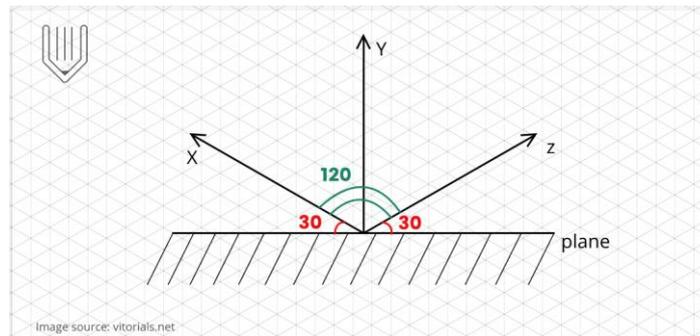


Figura 61. Características da representação isométrica.

Ao contrário do desenho em perspectiva, onde as linhas convergem e as cotas não são verdadeiras, as linhas num desenho isométrico são paralelas e a verdadeira dimensão do objeto é usada para construir o desenho. Essas dimensões podem ser obtidas a partir de vistas ortogonais ou por medição direta. Desenhos ou imagens isométricas tornaram-se o padrão da indústria aeronáutica para manuais de peças, propostas técnicas, ilustrações de patentes e publicações de manutenção, devido ao uso de dimensão real e à capacidade de serem entendidos por pessoas não treinadas.

Também é frequente representar vistas explodidas de montagens na vista isométrica (§ Module 5.5.9). Uma vista explodida mostra as peças individuais que constituem um objeto e sua posição relativa antes de serem montadas, juntamente com o relacionamento ou a ordem da montagem. Os componentes do objeto são mostrados ligeiramente separados por uma distância ou suspensos no espaço circundante no caso de um diagrama explodido em 3D. Um objeto é representado como se houvesse uma pequena explosão emanando do seu centro, fazendo com que as partes constituintes estejam separadas de igual distância da sua localização original. Este desenho ajuda a montar sistemas mecânicos (geralmente os componentes mais próximos do centro são montados primeiro), mas também na desmontagem de componentes, onde as peças externas normalmente são removidas primeiro [40].

O dimensionamento (§ Module 5.6.8) é fundamental para fornecer uma descrição clara e completa de um objeto. Um conjunto completo de dimensões fornece apenas uma interpretação possível para construir a peça. A ISO 129 [51] estabelece os princípios gerais de dimensionamento aplicáveis a todos os tipos de desenhos técnicos. Livros de desenho técnico, como [40], gerais contêm informações sobre como aplicar corretamente dimensões a um desenho. Algumas dimensões também podem incluir a tolerância associada, mesmo que o bloco de título não tenha indicação sobre as tolerâncias gerais a serem aplicadas.

Um desenho pictórico (§ Module 5.6.9) geralmente fornece uma imagem em perspectiva para ajudar a entender a forma de um objeto ou para interpretar um desenho. Ele mostra um objeto como aparece aos olhos do observador, mas não é satisfatório para mostrar geometrias complexas. Embora possam mostrar claramente o arranjo geral, não mostram detalhes (incluindo detalhes internos) nem dimensões. Desenhos pictóricos são úteis para mostrar a aparência geral de um objeto e são usados extensivamente com desenhos de projeção ortogonal. São usados em manuais de manutenção e revisão de aeronaves.

5.6 SISTEMAS DE CAD

Existem dois tipos de sistemas de projeto assistidos por computador usados para a produção de desenhos técnicos: bidimensional (2D) e tridimensional (3D). Os sistemas CAD 2D e 3D podem ser usados para produzir desenhos técnicos para qualquer disciplina; cada uma (eletricidade, eletrônica, pneumática, hidráulica, ...) possui símbolos reconhecidos pela indústria para representar componentes comuns (§ Módulo 5.6.1).

Sistemas CAD 2D, como *AutoCAD* ou *MicroStation*, substituíram a disciplina de desenho em papel. As linhas, círculos, arcos e curvas necessários são criados no software, mas dependem da competência do utilizador em produzir o desenho. Um sistema CAD 2D é apenas uma prancha eletrônica, e ainda há lugar a erros na representação de projeções ortogonais, projeções auxiliares e vistas. A sua maior vantagem sobre o desenho em papel é a possibilidade de realização de revisões e emendas: enquanto no desenho manual convencional, um novo desenho deve ser feito do zero se for encontrado um erro ou uma modificação necessária, no CAD 2D o sistema permite que uma cópia do original seja modificada, economizando tempo considerável. Os sistemas CAD 2D podem ser usados para criar planos para grandes projetos, como aeronaves, mas não fornecem uma maneira fácil de verificar se os vários componentes se encaixam.

Os sistemas CAD 3D (como *CATIA*, *NX Graphics*, *CREO*, *Autodesk Inventor*, ou *SolidWorks*) primeiro produzem a geometria tridimensional da peça, e o desenho técnico vem das vistas dessa geometria definidas pelo utilizador. Qualquer vista ortogonal, projetada ou cortada, é criada pelo software: não há margem para erro na produção dessas representações. A principal possibilidade de erro está na definição dos parâmetros de projeção e na exibição dos símbolos relevantes no desenho. Atualmente, o *AutoCAD* e outros softwares 2D tradicionais também têm a capacidade de criar desenhos paramétricos em 3D, mas não foram originalmente desenvolvidos para esse tipo de trabalho. Por sua vez, o CAD 3D permite que peças individuais sejam montadas para representar o produto final. Edifícios, aeronaves, navios e carros são modelados, montados e verificados em 3D antes dos desenhos técnicos serem libertados para fabricação. O pacote de software CAD/CAM mais amplamente utilizado na indústria aeroespacial é o *CATIA* da Dassault Systemes/IBM. As maiores empresas que operam no setor usam a *CATIA* para projetar e a maioria também para gerir o projeto [7].

Os modelos CAD 3D podem ser estruturas de arame, áreas ou sólidos (§ Módulo 5.6.2). O modelo final geralmente é um sólido, mas a sua maioria é gerada a partir de uma estrutura de arame na modelação, passando a um modelo de superfície, que é finalmente transformado num modelo sólido. Atualmente, algumas empresas trabalham apenas com versões eletrônicas dos desenhos em 3D (sem a necessidade de produzir desenhos em 2D). Nesse caso, os desenhos 3D são anotados com símbolos e notas para incluir todas as informações necessárias à produção. O modelo 3D pode ser usado para uma grande variedade de disciplinas, como renderização, animação 3D, estudos ergonómicos, cálculo (CAE, Computer Aided Engineering), manufatura (CAM, Computer Aided Manufacturing) e computadores de controlo numérico (CNC, Computer Numerical Control) (§ Módulo 5.6.3).

6 PROJETO DE AERONAVES

6.1 GESTÃO DE PROJETO

A gestão de projeto é muito mais do que simplesmente planejar as atividades do projeto, como proposto para o Learn & Fly. O principal objetivo da gestão de projetos é iniciar, planejar, executar, controlar, fechar o projeto e alocar o trabalho em equipa para atingir objetivos específicos no tempo definido. Esses objetivos são os requisitos do projeto, que devem estar em conformidade com os objetivos do cliente. Atualmente, os princípios da *lean manufacturing* foram introduzidos na gestão de projetos, dando ênfase ao valor para o cliente com menos desperdício e tempo reduzido.

Um *chat de Gantt* é uma das ferramentas geralmente usadas para planejar, mostrar os relacionamentos de dependência entre as atividades e alocar pessoas para um projeto [52]. Henry Gantt implementou-a pela primeira vez nos anos 1910-1915. Nesse período, os gráficos de Gantt foram desenhados em papel, limitando a sua atualização quando necessário para ajustar as mudanças no cronograma. Atualmente, os gráficos de Gantt são desenhados num computador, usando softwares específicos (alguns deles *freeware*) ou implementados em folhas de cálculo simples (com muito menos ferramentas de gestão). Atualmente, o software de computador baseado em *chats de Gantt* é uma das ferramentas de gestão mais amplamente usadas para agendamento e controlo de projetos [52]. Com o avanço da internet, esses gráficos podem tornar-se facilmente disponíveis online para a equipa, permitindo um trabalho colaborativo.

A figura apresentada nos slides (Seção 6.2) exemplifica um gráfico de Gantt, onde é possível criar todas as tarefas, a dependência entre eles e alocar recursos. A maioria delas permite analisar em tempo real o estado do projeto proporcionalmente ao grau de conclusão e fornecer uma representação visual de como o projeto e as suas tarefas estão adiantados ou atrasados.

6.2 DESENVOLVIMENTO DE PRODUTO

Todos os produtos devem ser desenvolvidos seguindo uma série de estágios envolvendo trazer um produto do conceito ou ideia, através da certificação. O desenvolvimento de produtos incorpora toda a jornada de um produto. Em geral, é comum haver várias etapas no desenvolvimento do produto, como: conceito, design preliminar, desenvolvimento, produção e certificação. Antes de iniciar o conceito, é necessário estabelecer requisitos de projeto e realizar análises de requisitos, às vezes denominadas por definição de problemas. Isso inclui coisas básicas, como funções, atributos e especificações. O estágio conceptual é geralmente uma fase do planeamento do projeto que inclui a produção de ideias e a consideração dos prós e contras da implementação dessas ideias. Existem várias técnicas usadas para ajudar a gerar esses conceitos [53]. O design preliminar está entre as etapas de conceito e desenvolvimento. Nesta fase, as ideias do conceito de conceptualização são de alguma forma detalhadas com a ajuda de alguns esquemas, diagramas e *layouts* do projeto para fornecer a configuração inicial do projeto. Depois disso, o desenvolvimento começa detalhando todos os recursos do projeto, incluindo a aquisição de materiais. Nesta fase, os desenhos técnicos são produzidos através de modelagem sólida (desenhos 3D), incluindo montagens, desenhos 2D detalhados para fabricação, simulações, documentação, etc. O software de design auxiliado por computador (CAD) pode fornecer ao projetista todas as ferramentas necessárias para a execução de todas essas tarefas com apenas um produto. Após o estágio de desenvolvimento, inicia a produção com o planeamento. Tal consiste em planejar como produzir o produto e que ferramentas devem ser

usadas no processo de fabricação. Esta etapa inclui a determinação da sequência de operações, a seleção de ferramentas como acessórios, ferramentas de corte e conformação. Após o planejamento, ferramentas, moldes etc. são projetados, produzidos e testados para dar suporte à produção. A Qualificação e Certificação é a última etapa e uma das mais importantes em produtos para a indústria aeronáutica. Essa fase é representada apenas no final, mas todos os estágios, do conceito à produção, devem ter em mente os requisitos de certificação.

Para cada estágio, há uma série de metas. Isso inclui a Revisão do conceito de sistema (objetivos do projeto, definição de requisitos, conceitos de projeto, viabilidade do projeto e cronograma e orçamento geral), a Revisão preliminar do projeto (analisa o design inicial dos subsistemas, interfaces e itens de configuração em relação ao requisito de design), a Critical Design Review (é um dos marcos e análises mais importantes de todo o design para produção). Depois disso, inicia-se a produção e, algumas vezes, é necessária uma revisão da produção. No final, vem a inspeção do primeiro artigo (FAI), que envolve o fornecedor e o comprador para garantir que o processo de produção produza, de forma confiável, o que se destina. A norma AS9102 [41] fornece os requisitos para componentes aeroespaciais para a inspeção do primeiro artigo. A FAI deve ser repetida sempre que houver uma alteração no design que afete o ajuste, forma, função do produto ou se o processo de produção usado para fazer a peça mudar a fabricação (por exemplo, ferramentas, processos, máquina, localização, sequência de fabricação).

6.3 SUSTENTABILIDADE DO PRODUTO

Qualquer projetista ou engenheiro deve ter em mente que o mundo possui um número limitado de recursos e que qualquer decisão pode causar sérios impactos ambientais no futuro. Deve ser capaz de procurar continuamente novos produtos nos quais os novos materiais e métodos de produção possam ser usados em conjunto com um design sustentável. Segundo Ljungberg [54], os recursos de energia provavelmente serão mais críticos no futuro do que a disponibilidade de materiais. Além disso, a relação entre material e energia é óbvia. Existem milhares de materiais diferentes envolvidos em produtos simples que são usados todos os dias. As estimativas indicaram que provavelmente existem mais de 100.000 materiais comerciais no mercado em relação à grande quantidade de variantes. Isso causa um ciclo de vida extremamente complexo dos produtos, da extração do material ao desperdício ou deposição do produto usado [53].

O desenvolvimento de produto para produtos de sucesso pode ser fortalecido seguindo sete princípios, nomeadamente [53]:

- **Material.** Minimizar o uso do material e tentar usar materiais renováveis. Minimizar o consumo de energia durante a ACV e evitar materiais tóxicos, etc.
- **Economia.** O produto e o serviço devem ser rentáveis e comparáveis a produtos similares. Considere o custo total durante o ciclo de vida, incluindo o custo para restaurar os impactos ambientais.
- **Design.** Projete para o meio ambiente e para o usuário do produto, bem como para a reciclagem!
- **Mercado.** Desenvolva produtos e projete-os de acordo com as necessidades do mercado e grupo-alvo específicos.
- **Equidade.** O comércio é justo e qual é o impacto na comunidade local e global? E as condições de trabalho dos funcionários?
- **Tecnologia.** Otimize a extração de matérias-primas, produção, vida útil e qualidade e funcionalidade do produto.
- **Ecologia.** Elimine emissões e resíduos e minimize o impacto ambiental.

6.4 REQUISITOS TÉCNICOS

Aspectos como desempenho, confiabilidade, custo e disponibilidade devem ser considerados para concluir com êxito um projeto. No entanto, os requisitos técnicos podem ser muito mais do que isso e o gestor de projeto deve selecionar os assuntos reais para o consumidor. O modelo Kano, desenvolvido pelo professor Noriaki Kano na década de 1908, pode ser usado para o desenvolvimento de produtos e a satisfação do cliente, classificando as preferências do cliente em cinco atributos: "Atraente", "Unidimensional", "Imprescindível", "Indiferente" e "Reverso" [55].

Os slides da seção 6.4 identificam alguns desses atributos aplicados à aeronave que os alunos devem desenvolver para o desafio Learn&Fly.

- Atributos obrigatórios: espera-se que esses atributos estejam implicitamente presentes no produto. Quando estes não estão presentes ou são apresentados num nível baixo, o cliente pode ficar extremamente insatisfeito. Para o Learn&Fly, isso está explícito no Regulamento - Requisitos de Aeronaves. O não-cumprimento de todos esses requisitos deve resultar em penalização ou mesmo desqualificação;
- Atributos unidimensionais: são os atributos que estão linearmente correlacionados com a satisfação. Também chamados de recursos de desempenho. Ou seja, quanto melhor forem executados, maior será a satisfação do cliente. Alguns exemplos são fornecidos nos slides como: construção leve; pequeno arrasto ou massa e equilíbrio bem feito;
- Atributos atrativos: são atributos inesperados ou inovações. No entanto, a ausência desses atributos não traz insatisfação ao fornecedor. Exemplos como: novo formato da asa, diferente formato do estabilizador, solução para fácil desmontagem da asa;
- Atributos indiferentes: são atributos com os quais os clientes ficarão satisfeitos ou insatisfeitos com seu nível de desempenho. Exemplos: pintura, toda feita de fibra de carbono;
- Atributos reversos: são atributos cuja presença resulta em insatisfação, como apoio de pé preso à aeronave ou mesmo, por exemplo, trem de pouso que aumentará o peso e a força de arrasto, a menos que seja essencial, por exemplo, evitar que a aeronave seja danificada ao pousar.

6.5 FERRAMENTA PARA CONCEPTUALIZAR UM MODELO DE PLANADOR

A seção 6.5 dos slides fornece uma ferramenta de folha de cálculo para criar o modelo de planador. Os engenheiros nos estágios iniciais do desenvolvimento do produto geralmente usam ferramentas simples para conceber os seus modelos e ter uma ideia geral de como o produto deve ser para atender aos requisitos. Essas ferramentas são geralmente implementadas em folhas de cálculo e na maioria das vezes são baseadas em modelos empíricos desenvolvidos a partir de conhecimentos anteriores ou modelando alguns aspectos físicos básicos com muitas suposições para simplificar.

A folha de cálculo disponível juntamente com os slides "Tool do Concept Glider Model", foi desenvolvida tendo em consideração as dimensões gerais que são empiricamente utilizadas no desenvolvimento de modelos de aeronaves. As dimensões iniciais do planador/aeronave podem ser obtidas usando esta ferramenta, porém podem não ser as melhores. A intenção da ferramenta é fornecer uma forma simples para os alunos definirem a primeira iteração do seu planador, que tem uma grande probabilidade de voar, e para os alunos se habituarem a uma folha de cálculo.

Quase todas as dimensões do planador estão diretamente relacionadas com a corda da asa “C” (linha reta imaginária que une o bordo de ataque e o bordo de fuga do perfil, conforme fornecido nas imagens dos slides e na Figura 62). Isso significa que, se os alunos definirem a corda de asa, todas as outras dimensões serão definidas, entre certos limites. Os limites são indicativos e são indicados nas colunas Min e Max, tornando-se a coluna “Valor usado” verde se estiver dentro dos limites e amarela se estiver fora. Se algumas dimensões ultrapassarem os limites fornecidos, isso não significa que a aeronave não voa. Às vezes, para um design ideal, é necessário ultrapassar alguns desses limites. Algumas dimensões longitudinais são relativas ao centro de pressão da asa que está próximo de $\frac{1}{4}$ da do bordo de ataque asa, conforme Figura 62. Na Tabela 10, pode encontrar algumas explicações sobre alguns parâmetros fornecidos na “Ferramenta para conceptualizar o planador”. A maioria desses parâmetros é necessária para que os alunos simulem o planador no X-Plane (§ Módulo 7) ou construam o planador (§ Módulo 6).

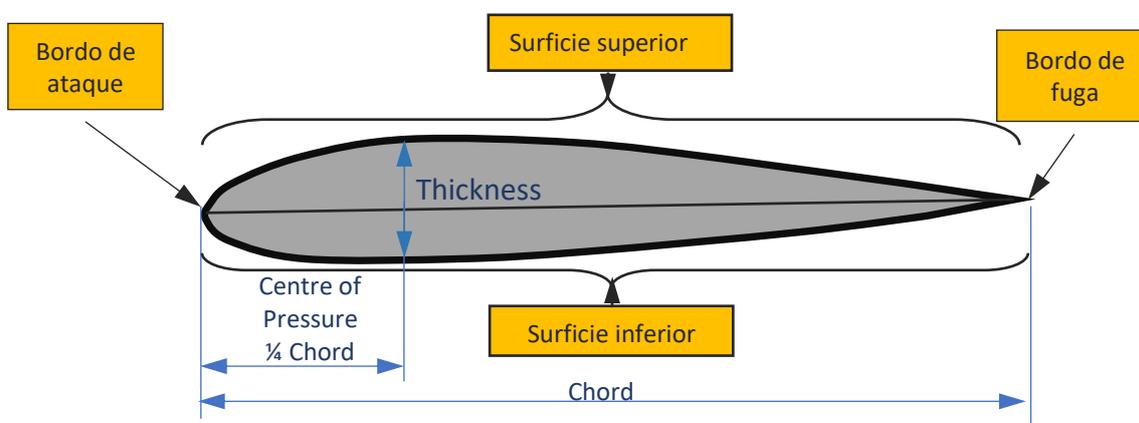


Figura 62. Perfil do aerodinâmico, identificando a corda da asa.

Tabela 10. Explicações da Folha de Cálculo “Ferramenta para conceptualizar o planador”

	Símbolo	Fórmula	Obs.
Asas			
Corda (C)	C	C	Corda media da asa
Envergadura (se o planador tiver 8 a 10C ou mais)	E	E/C	A envergadura (dimensão total da asa)
Ângulo de incidência da asa [°]	AI		Este é o ângulo que a asa deve ter quando montada, em relação à fuselagem
Posição longitudinal da asa	La	$N + 1/4 C$	Esta é a posição da asa (centro de pressão) em relação ao nariz da aeronave. Para o equilíbrio propõe-se que às vezes é melhor ter um nariz maior.
Área da asa [unidade] ²	A	$C \times E$	A área da asa tem um limite, que deve ser cumprido, especificado pelos Regulamentos do Desafio Learn & Fly.
Fuselagem			

Do bordo de ataque da asa ao nariz (1C)	N	C	Posição da asa (borda) em relação ao nariz da aeronave.
Do bordo de ataque da asa ao estabilizador (1,5 a 2C)	F	2 x C	Tamanho da borda traseira da asa até a borda principal do estabilizador
Comprimento total da fuselagem (N + C + F + Ch)	L	N+C+F+Ch	Tamanho total da fuselagem
Diâmetro da fuselagem	D		Diâmetro da fuselagem, necessário para fins de simulação no X-Plane.
Estabilizador horizontal			
Corda do estabilizador horizontal (2/3 to 3/4 of C)	Ch	$\frac{3}{4} \times C$	Corda média do estabilizador horizontal
Comprimento do estabilizador horizontal (2 to 2,5C)	Eh	2 x C	Comprimento total do estabilizador horizontal
Ângulo de incidência do estabilizador horizontal (0° to 5°) [°]	Ih	-5	Este é o ângulo que o estabilizador deve ter quando montado, em relação à fuselagem. Pode ser positivo se o centro gravitacional estiver atrás do centro de pressão.
Posição longitudinal do estabilizador horizontal (de C)	Lh	N+C+F+ $\frac{1}{4}$ xCh	Esta é a posição do estabilizador (centro de pressão) em relação ao nariz da aeronave.
Estabilizador vertical			
Corda do estabilizador vertical (3/4 to 1C)	Cv	$\frac{3}{4} \times C$	Corda média do estabilizador vertical
Altura do estabilizador vertical (1C)	Ev	C	Altura do estabilizador vertical
Posição longitudinal do estabilizador vertical	Lv	N+C+F+ $\frac{1}{4}$ xCv	Esta é a posição do estabilizador vertical (centro de pressão) em relação ao nariz da aeronave.
Superfícies de controlo (opcional)			
Corda do estabilizador horizontal (1/3 da corda do estabilizador)	Clp	$\frac{1}{3} \times Ch$	Este é a corda média do leme
Corda do estabilizador vertical (1/2 da corda do estabilizador)	Cld	$\frac{1}{2} \times Cv$	Este é a corda média do elevador
Corda de Aileron (1/3 de C)	Cla	$\frac{1}{3} \times C$	Este é o corda média do aileron
Comprimento de Aileron (2C)	Ela	2 x C	Este é o comprimento do aileron
Posição do centro de gravidade (CG) ((N + 0,1 C) a (N + 0,3 C))	CG	1.23 x C	Esta é a posição recomendada do centro de gravidade, em relação ao nariz.

6.6 Razão de planeio

A razão de planeio, "*Glide Slope Ratio*", indica quão bem um planador voa no ar. Geralmente, isso também se aplica a aeronaves (mais pesadas que o ar) que voam como um planador (aeronaves sem motor). Isso indica a que distância o planador avançou para cada pé ou metro que caiu em altitude.

Razão de Planeio = Distância horizontal percorrida dividida pela altitude perdida.

(§ Módulo 6.6)

Existem vários parâmetros que influenciam a razão de planeio. Uma das mais importantes é a aerodinâmica, fortemente influenciada pela velocidade. A melhor velocidade de alcance corresponde a um ângulo de ataque, que fornece a melhor taxa de sustentação / arrasto. Quanto melhor for a relação Lift / Drag (consulte o Módulo 3 e a próxima secção), melhor será a proporção de deslizamento. O arrasto da asa também pode ser reduzido, aumentando a proporção da asa e alterando o formato da asa na ponta da asa, de acordo com a secção 6.8. Obviamente, tudo importa, incluindo a aerodinâmica da fuselagem (que deve ter o menor arrasto possível) e dos estabilizadores. Observe que o peso da aeronave também influenciará, sendo necessário determinar a melhor velocidade, tendo em consideração que as forças que atuam na aeronave também mudaram. Uma aeronave bem equilibrada reduzirá as forças induzidas nos estabilizadores, reduzindo o arrasto.

6.7 ESCOLHA PERFIL AERODINÂMICO

A escolha do perfil aerodinâmico tem uma forte influência na aerodinâmica, criando a força de sustentação (L) para sustentar o peso, mas também criando uma força de arrasto (D) que deve ser reduzida o máximo possível. Para calcular as forças de sustentação e arrasto, os coeficientes CL e CD devem ser obtidos para cada perfil aerodinâmico específico. Na internet, pesquisando, por exemplo, “perfil aerodinâmico”, encontrará muitas ferramentas disponíveis, a maioria delas gratuitas, para determinar os valores de CL e CD e o formato de milhares de perfis de aerodinâmicos. O site <http://airfoiltools.com> é um desses exemplos. O melhor perfil aerodinâmico depende de muitos parâmetros, incluindo o tipo de aeronave, o formato da asa e a velocidade normal da aeronave. Para a aeronave que está a projetar, que voa como um planador, é muito importante alcançar a maior relação possível de CL / CD com um determinado ângulo entre o corda e o fluxo de ar, ângulo de incidência (ângulo alfa). A maioria dos perfis aerodinâmicos foi desenvolvida pelo Comitê Consultivo Nacional de Aeronáutica (NACA), sendo organizada pelos números da NACA. Os parâmetros no código numérico seguido pela NACA podem ser inseridos em equações para gerar a seção transversal do perfil aerodinâmico e calcular suas propriedades [56]. Cada série de perfis aerodinâmicos da NACA possui sua faixa ideal de operação, como pode ser visto neste caderno [56].

Os slides apresentam como exemplo dois perfis comuns para a aviação geral (NACA 2412 e Clark Y (perfil não NACA)). Com esses perfis, um planador pode voar bem, mas existem perfis melhores para baixa velocidade que os alunos podem encontrar. O melhor perfil deve ter a maior relação possível de CL / CD para um ângulo alfa específico (ângulo entre o corda e o fluxo de ar). Em geral, um valor alfa de 2º é recomendado para aeronaves.

Na seção 6.7, são fornecidas as fórmulas para calcular CL e CD, incluindo os valores de alguns parâmetros necessários.

A geometria 2D do perfil aerodinâmico pode ser descarregada de websites como <http://airfoiltools.com>, em forma de coordenadas, que podem ser usadas numa folha de cálculo de um software CAD. Essa geometria pode ser impressa em papel para cortar as nervuras das asas com a secção direita ou numa impressora 3D. Para gerar o desenho 3D para impressão, os alunos podem usar um software como o Fusion 360® (da Autodesk®) ou FREECAD. Para importar pontos para o software CAD, poderá encontrar na internet procurando “Importando XYZ para...”.

6.8 ARRASTO DA ASA

Os parâmetros de CL e CD, e conseqüentemente levantar e arrastar, calculados na última secção, são válidos para uma asa infinita. Se a asa tiver dimensões finitas, correções devem ser feitas fora do escopo deste projeto. No entanto, os alunos devem estar cientes desse problema e podem melhorar a ala para aumentar a sua eficiência. A ponta da asa é o fator mais problemático que afeta o comportamento da asa. Devido à diferença de pressão entre as partes inferior e superior de uma asa, o fluxo de ar e os vórtices indesejados tendem a ser criados de acordo com a Figura 63, perdendo energia.

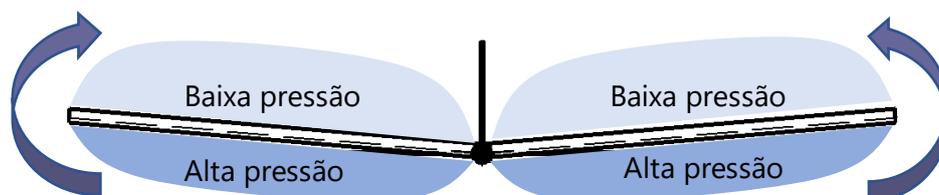


Figura 63. Diferença de pressão entre as partes inferior e superior de uma asa.

Para reduzir esse problema, os designers tentam reduzir o tamanho da ponta da asa aumentando a proporção da asa (extensão da asa / corda), Figura 64, ou alterando o formato da asa (para elíptico ou cônico) ou criando uma asa como a da Figura 65. No entanto, todas essas características às vezes são difíceis de produzir, aumentando os custos de produção.

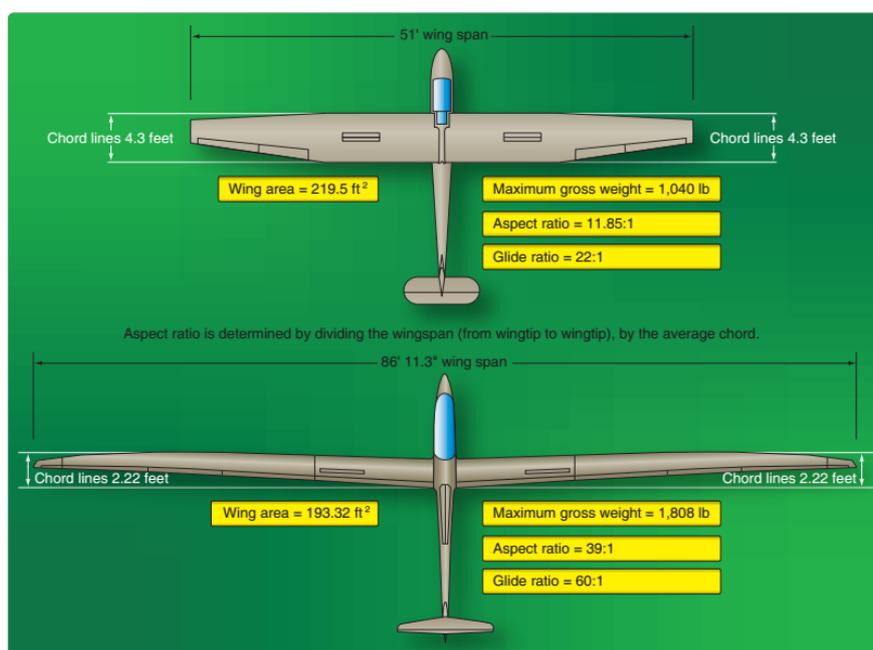


Figura 64. Influência da razão de aspecto na proporção de deslizamento [57].



Figura 65. Boeing 737-700 com *winglets*.

6.9 ESTABILIDADE LATERAL

O planador desenvolvido não possui superfícies de controle que possam controlar o movimento da aeronave, como o leme, o elevador ou as abas. Para garantir um voo adequado e uma distância maior, de acordo com o Desafio Learn & Fly, o planador deve voar o mais recto possível. No entanto, devido a algum desequilíbrio na aeronave ou mesmo a alguma asa ou alterações na pressão da parte esquerda da asa para a parte direita da asa, a aeronave pode ter uma tendência a virar para o lado. Para reduzir esse comportamento, um ângulo diédrico, Figura 66, pode ser adicionado, melhorando consideravelmente a tendência de retornar ao voo no nível das asas. Na Figura 67 é mostrado que, adicionando algum diédrio quando a aeronave tende a virar para um lado, a força de sustentação aumenta na asa que abaixa, voltando-a para o voo no nível das asas.



Figura 66. Ângulo diédrico

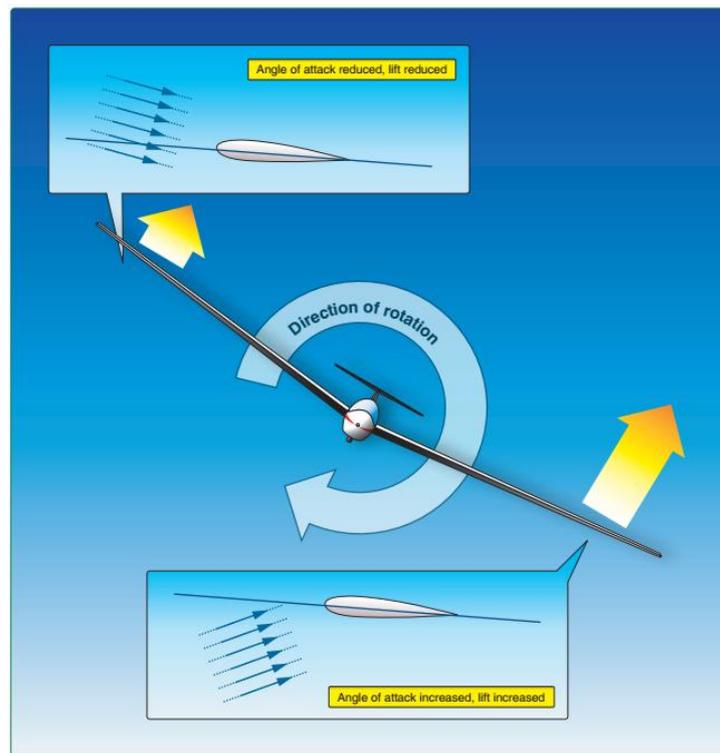


Figura 67. Estabilidade lateral

6.10 SELEÇÃO DE MATERIAIS

O módulo 2 fornece uma visão geral dos materiais utilizados na construção de aeronaves (§ Módulo 2). Para construir aeronaves modelo, os materiais são diferentes dos aplicados em aeronaves reais porque os requisitos são outros, pelo menos em termos de escala. Por exemplo, na maioria das aeronaves, a pele é feita de uma fina folha de alumínio. Seria impraticável produzir chapas de alumínio extremamente finas para o modelo de aeronave, para que outros materiais possam ser usados.

Para o desafio Learn & Fly, é proposto um kit básico de materiais. Eles são facilmente encontrados no mercado a baixo custo e podem ser usados como primeira abordagem para a construção de uma boa aeronave. No entanto, os estudantes são livres e devem ser incentivados a usar materiais diferentes que possam ser mais apropriados do que os apresentados.

6.11 FUSÍVEIS

Em muitas situações, as aeronaves possuem fusíveis para proteger alguns sistemas mecânicos de danos. Por exemplo, se a falha ocorre num motor e isso cria vibrações excessivas nas asas, pode danificar também a asa. Nesse caso, os motores são suportados por fusíveis, perdendo o motor e evitando estender o dano às asas. Assim, a aeronave pode voar sem o motor (no limite, como um planador, se nenhum outro motor estiver funcionando), mas a aeronave não pode voar e ser controlada sem asa.

Para o Learn & Fly Challenge, para cumprir todos os requisitos dos regulamentos, os fusíveis podem ser aplicados para sustentar algumas partes estruturais da aeronave. Eles podem danificar-se em determinadas circunstâncias, por exemplo, durante o teste de queda ou quando a aeronave cai no chão e devem ser remontados num tempo limite, conforme especificado nos regulamentos.

6.12 DESENHOS

O Capítulo 5 fornece uma visão geral sobre desenho técnico que deve ser estudado para fornecer alguns antecedentes para que os alunos possam produzir o desenho necessário para o relatório que devem enviar para o Desafio Learn&Fly.

Os desenhos do relatório podem ser feitos à mão ou usando o software CAD, como o AutoCAD® ou o software nativo 3D paramétrico. As projeções ortogonais (múltiplas vistas) devem ser fornecidas com detalhes de alguns recursos, como acessórios, asas, estabilizadores, etc. com dimensões. Recomenda-se adicionar também uma vista isométrica, com balões, para identificar cada peça que deve ser listada na lista de materiais (BOM).

A lista técnica nos desenhos técnicos contém muitas informações relevantes sobre cada peça ou montagem, como quantidades, número de peça, descrição, materiais usados, padrões aplicados, moldes, etc. Para o desafio Learn&Fly, esta lista não precisa ser tão completa; o custo dos materiais deve ser incluído, pois os regulamentos impõem um limite em termos de orçamento.

6.13 Peso e Centragem

Uma aeronave está em equilíbrio quando todas as suas forças estão em equilíbrio (§ Módulo 3). Um dos fatores mais importantes para garantir a estabilidade longitudinal é a posição do centro de gravidade (CG). O CG é o ponto em que a força total da gravidade é considerada para agir. Experimentalmente, a posição do CG pode ser determinada conectando a aeronave a um ponto simples (o CG) com um cabo flexível. Se o ponto de conexão coincidir com o CG, a aeronave permanecerá na posição horizontal. Caso contrário, é necessário mover o ponto de fixação para encontrar a posição correta do CG.

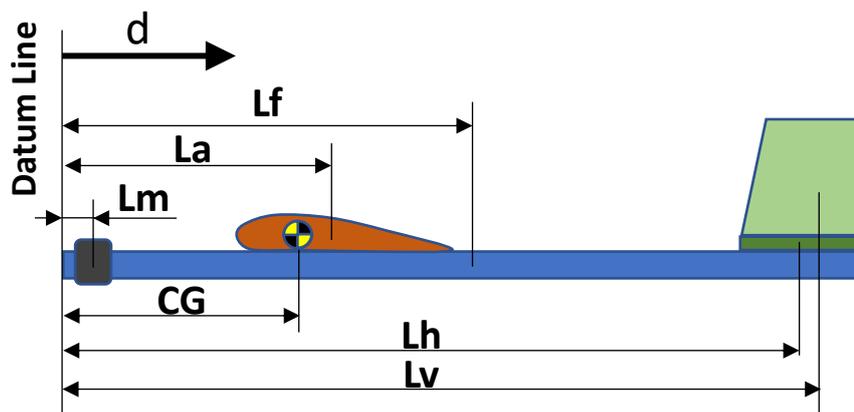
Numa aeronave, a posição do CG deve estar um pouco à frente em relação à força de sustentação (L) (localizada aproximadamente na posição $\frac{1}{4}$ do corda da asa). O momento do passo criado entre a força L é equilibrado pelo estabilizador horizontal que deve produzir uma força descendente (F). Para que isso aconteça, o estabilizador horizontal deve ter um ângulo de incidência negativo (ângulo relativo à fuselagem). Dependendo da posição relativa de L a W, F deve aumentar ou diminuir. Essa compensação é feita em aeronaves reais com pequenos ajustes que, dependendo da aeronave, podem introduzir um pequeno movimento no elevador para introduzir essa compensação. No entanto, essa compensação é limitada, o que significa que o GC somente pode mudar dentro de certos limites, conforme explicado nos slides do Módulo 3.



Figura 68. Forças verticais principais atuando em aeronaves.

Para que os alunos entendam a física, é necessário que possam estimar matematicamente a posição do GC. Conforme explicado nos slides, módulo 3.4.1, o CG pode ser determinado, sabendo que o momento total relativo a um ponto deve ser zero.

Particularmente, no caso de um modelo de aeronave, os alunos devem desenvolver o seu modelo de forma que o centro de gravidade esteja próximo à força L (1/4 da corda da asa). Para que isso aconteça, em geral, eles devem adicionar algum peso (que devem ser calculados) no nariz da aeronave. De acordo com a Figura 69, eles devem encontrar a massa na posição L_m (nariz) para colocar o CG em cerca de 1/4 da corda da asa ou um pouco à frente.



CG - Posição do centro de gravidade

Lf - Posição longitudinal da fuselagem

La - posição longitudinal da asa

Lm - posição longitudinal da massa adicionada

Lh - posição longitudinal do estabilizador horizontal

Lv - Posição longitudinal do estabilizador vertical

Figura 69. Nomenclatura para calcular a posição do CG.

A posição do CG pode ser calculada pela fórmula, derivada do equilíbrio do momento:

$$CG = \frac{\sum(Peso \times d)}{\sum Peso} \quad (5)$$

Sendo:

O Peso corresponde aos pesos individuais de cada componente e d à distância de cada componente (L_f , L_a , L_m , L_h , L_v ...) até à linha de referência (posição CG de cada um).

O peso representa o peso de toda a aeronave.

O peso de cada componente (fuselagem, asa, massa adicionada) pode ser calculado usando a tabela com densidades de materiais no final dos slides (§ Módulo 6.13).

Para verificar e ajustar experimentalmente o CG da aeronave (adicionando ou removendo massa no nariz), os alunos devem apoiar a aeronave em dois pontos próximos a $\frac{1}{4}$ da corda (ou um pouco à frente) e verificar se ela permanece horizontal (§ Módulo 6.13).

6.14 COMO LANÇAR A AERONAVE

A técnica de lançamento é de grande importância para um bom voo. O slide na seção 6.14 fornece algumas recomendações básicas para executar um bom lançamento. Melhor do que tudo, é testar o lançamento várias vezes para melhorar a técnica.

Durante o voo, os alunos devem entender se o planador está a voar corretamente ou não. Em geral, o problema usual é que os planadores não estão em equilíbrio, fazendo com que o planador pare ou mergulhe de acordo com o último slide das seções 6.14.

Esse comportamento também pode ser ajustado aumentando ou diminuindo o ângulo de incidência do estabilizador horizontal (ângulo em relação à fuselagem). Em geral, é possível obter uma configuração ideal e estável, com o CG um pouco à frente do centro de pressão (posição da força L) ($\frac{1}{4}$ da corda) e um pequeno ângulo de incidência negativo (força na punhalada horizontal).

6.15 COMO MEDIR A DISTÂNCIA DE VOO

Para avaliar a distância e a beleza do voo, no desafio Learn&Fly, a única distância contabilizada (distância percorrida medida) é projetada para a distância ideal de voo, como mostra a Figura 70. Isso pode ser feito simplesmente estendendo a Linha de Lançamento (linha azul na Figura 70) e medindo diretamente a distância do CG da aeronave (mesmo que desmonte) até essa linha (dimensão azul).

No entanto, para introduzir alguns conceitos matemáticos, é recomendável usar o Teorema de Pitágoras.

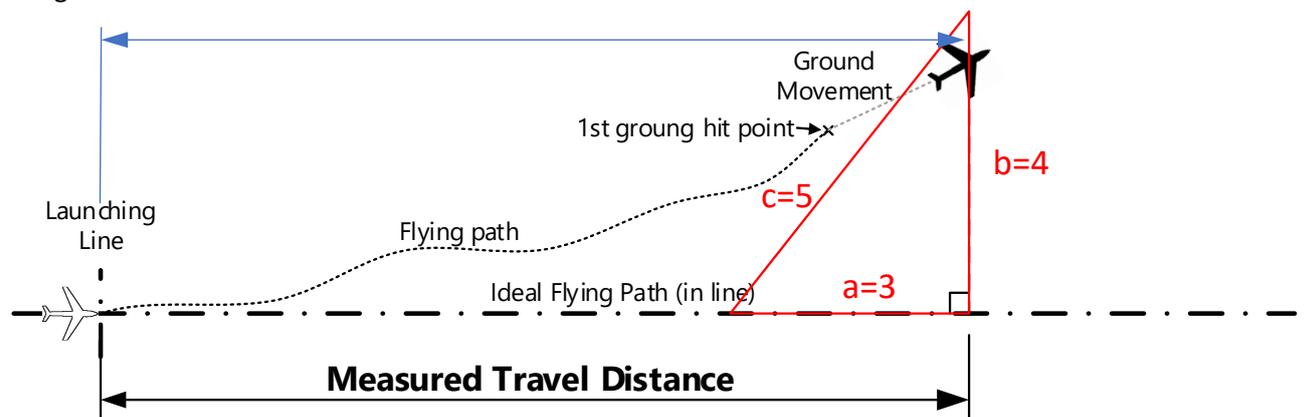


Figura 70. Como medir a distância de voo

De acordo com o Teorema de Pitágoras, o triângulo é retângulo (tem um ângulo com 90°), se a soma dos lados do quadrado 2 for igual ao quadrado da hipotenusa 2. Na Figura 70, isso significa que:

$$a^2 + b^2 = c^2$$

Se os alunos cortarem uma linha com tamanho $(3 + 4 + 5 = 12$ metros) e marcarem 3 metros, 4 metros e permanecerem, um terá 5 metros. Eles podem usar múltiplos das dimensões laterais para definir o triângulo. Por exemplo, $1,5 \times$ mais terá $(4,5 + 6 + 7,5 = 18$ metros)

$$3^2 + 4^2 = 5^2$$

$$9 + 16 = 25$$

Verificado!

7 SIMULAÇÃO

7.1 INTRODUÇÃO

A simulação por computador é a reprodução do comportamento de um sistema usando um computador para imitar os resultados de um modelo matemático associado a esse sistema. Como permite verificar a confiabilidade dos modelos matemáticos escolhidos, as simulações por computador tornaram-se uma ferramenta útil para o estudo de muitos sistemas naturais e humanos [58], incluindo o design e a engenharia de aeronaves. A simulação de um sistema é representada como a execução da saída do modelo do sistema, fornecendo dados de entrada. Pode ser usado para explorar e obter novas ideias sobre novas tecnologias e estimar o desempenho de sistemas muito complexos para soluções analíticas [58].

Nesse contexto, um simulador de voo é um dispositivo que recria artificialmente o voo da aeronave e o ambiente de voo, destinado à formação de pilotos, design de aeronave ou outros propósitos [59]. Tal inclui replicar as equações que gerem como as aeronaves voam, como reagem às aplicações dos controles de voo, os efeitos de outros sistemas de aeronaves e como esta reage a fatores externos, como a densidade do ar, turbulência, cisalhamento do vento, nuvem e precipitação. A simulação de voo é usada por várias razões, incluindo treino de voo (principalmente de pilotos), o design e desenvolvimento da própria aeronave e pesquisa sobre as características da aeronave e as qualidades de manuseio de controlo.

A Agência Europeia para a Segurança da Aviação (EASA) define várias categorias e níveis de simuladores de voo (§ Módulo 7.1): o mais básico é o nível de instrutor de navegação e procedimentos de voo (FNPT), seguido pelo nível de dispositivos de treino de voo (FTD); os simuladores mais avançados são classificados como simuladores de voo completo (FFS).

7.2 SIMULADOR DE VOO X-PLANE

X-Plane [60] é um programa disponível comercialmente, produzido pela Laminar Research (EUA), que pode ser executado em qualquer computador doméstico. Engloba várias aeronaves comerciais, militares e outras, bem como cenários globais básicos que cobrem a maior parte da superfície da Terra (de 74 ° norte a 60 ° sul), incluindo mais de 33.000 aeroportos [61]. O programa inclui várias aeronaves no pacote básico e, além disso, mais de 1.400 outros modelos podem ser descarregados da Internet [61], muitos dos quais gratuitamente.

O simulador *X-Plane* possui vários recursos que o tornam útil como ferramenta de engenharia, pois a maneira como calcula a trajetória de uma máquina voadora (§ Módulo 7.2) permite que os utilizadores projetem e testem as suas próprias aeronaves [61]. O *X-Plane* pode criar projetos complexos de aeronaves, incluindo helicópteros, foguetes, aeronaves rotativas e embarcações com rotor de inclinação. O programa modela as forças e os momentos que atuam na aeronave e avalia individualmente o seu efeito nas partes que a constituem, tanto na dinâmica de voo subsónico quanto supersónico. O levantamento e o arraste de cada seção são calculados e o efeito resultante é aplicado a toda a aeronave virtual. A aeronave simulada é então colocada em voo. Essa abordagem permite que os utilizadores projetem rápida e facilmente uma aeronave, pois o mecanismo do simulador ilustra imediatamente como uma aeronave com um determinado projeto pode apresentar-se no mundo real.

O pacote de demonstração do *X-Plane* é totalmente gratuito para utilizadores domésticos. Este tem algumas limitações, mas nenhuma invalida o seu uso no âmbito do Desafio Learn&Fly. Utilizadores domésticos ou de instituições K12 podem comprar o *X-Plane* por US \$ 69 (valor em 2018) se quiserem usar o *X-Plane* para outros fins.

No Desafio Learn&Fly, os alunos usarão o simulador de voo *X-Plane* para projetar e otimizar o planador que devem desenvolver e construir. As tarefas necessárias para simular o modelo são:

1. Definir o modelo a ser simulado (§ Módulo 6.5). A ferramenta de folha de cálculo fornecida (§ Módulo 6) pode ser utilizada para conceptualizar o modelo do planador.
2. Criar o modelo na ferramenta de desenvolvimento *Plane Maker* (§ Módulo 7.3) [62].
3. Executar o modelo no simulador do *X-Plane* (§ Módulo 7.4).

O *X-Plane* inclui algumas ferramentas de desenvolvimento para criar cenários, aeroportos e aeronaves personalizados. Estas ferramentas são gratuitas e não é necessária experiência para as utilizar.

7.3 WORLD EDITOR E PLANE MAKER

O *X-Plane* também inclui algumas ferramentas de desenvolvimento para criar cenários, aeroportos e aeronaves. Estas ferramentas são gratuitas e não necessitam de experiência prévia.

7.3.1 World Editor

É uma ferramenta que pode ser usada para criar cenários e aeroportos personalizados. De facto, o *X-Plane* foi projetado especificamente para permitir que os utilizadores criem e modifiquem os próprios cenários, o que pode incluir essencialmente tudo o que está fora da aeronave [63].

7.3.2 Plane Maker

O *Plane Maker* é um programa fornecido com o *X-Plane* que permite aos utilizadores projetar as suas próprias aeronaves. Usando este *software*, quase qualquer aeronave imaginável pode ser construída. Depois de todas as especificações físicas da aeronave serem inseridas (por exemplo, peso, envergadura da asa, deflexões de controlo, potência do motor, secções do perfil aerodinâmico), o simulador *X-Plane* preverá como esse avião voará sob condições impostas do mundo real, avaliando o desempenho, assim como acontece com as aeronaves inseridas no programa [60].

Os slides (§ Módulo 7.3.2) fornecem informações passo a passo sobre como criar um planador simples, de acordo com as instruções fornecidas na seção 6 (Projeto da aeronave). O *Plane Maker Manual* [62] fornece o fluxo de trabalho para criar um modelo, como a seguir. Como os alunos criarão um planador de modelos, a maioria dessas tarefas (riscadas/eliminadas) não é necessária:

1. Decidir um design (§ Módulo 6.5).
2. Criar a fuselagem, asas e cauda da aeronave.
3. Criar objetos secundários, como tens de aterragem e barreiras do motor.
4. ~~Configurar os sistemas e propriedades internas, incluindo os motores, sistema elétrico, peso e balanço, e pontos de vista.~~
5. ~~Configurar quaisquer recursos adicionais da aeronave, como armas adicionais ou controlos especiais.~~
6. Criar um painel de instrumentos 2D (opcional, mas recomendado).
7. Fazer o teste da aeronave no *X-Plane* e ajustar os recursos da aeronave das etapas 2 a 6, conforme necessário.

8. ~~Adicionar texturas, objetos 3D, etc.~~

O manual de acesso gratuito do *Plane Maker* [62] contém informações mais detalhadas e completas sobre o software.

7.4 X-PLANE

De maneira semelhante à última secção, os slides do Módulo 7 fornecem informações passo a passo sobre como pilotar o planador. Como é apenas um planador modelo, a ser lançado manualmente, a simulação deve ser pausada (pressionando “p”) assim que o *X-Plane* começar a colocar o planador no ar e fornecer a velocidade de lançamento. É assim que colocamos o planador no ar e o lançamos (pressionando “i”). Nas condições do desafio, a altitude em que os planadores são lançados é de cerca de 2 metros. No entanto, na simulação, 2 metros resultariam num voo muito lento e seria difícil avaliar o comportamento do planador. Como tal, é recomendável adicionar 100 pés à altitude (cerca de 33 metros), ou mais, para fins de simulação. Para informações mais detalhadas e completas sobre a simulação usando o *X-Plane*, o Manual do Usuário do X-Plane11 deve ser consultado [61].

Após modelar e simular a primeira abordagem ao planador, os alunos devem melhorar o modelo. Recomenda-se dar-lhes algum apoio no planeamento das suas tentativas e relatá-las ao modelo de relatório Learn & Fly, disponível na plataforma Moodle

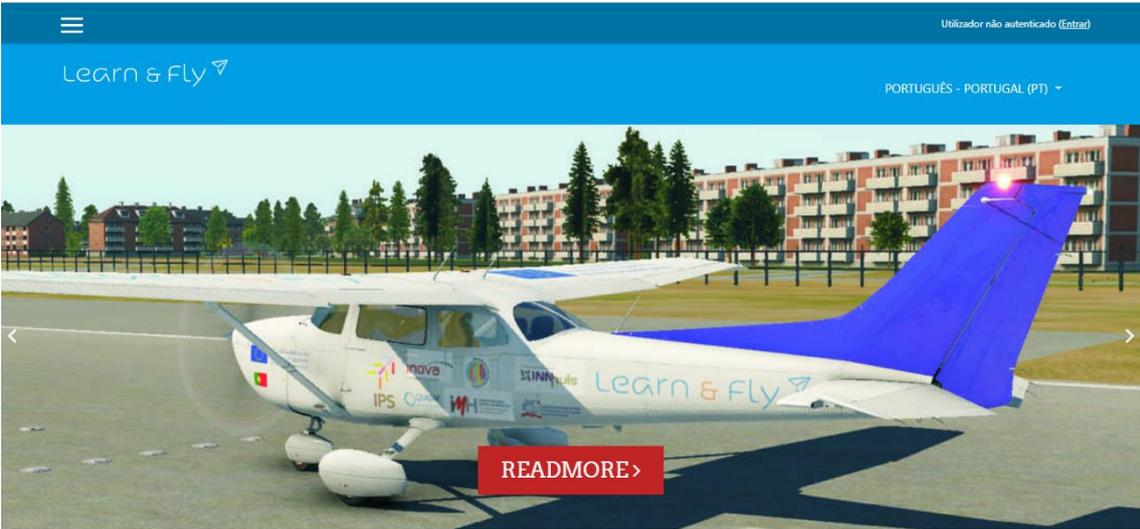
8 MOODLE

8.1 INTRODUÇÃO À PLATAFORMA MOODLE

O Moodle é um sistema de gestão de aprendizagem on-line, desenvolvido com a finalidade de fornecer aos educadores, administradores e estudantes um sistema robusto, seguro e integrado para criar ambientes de aprendizagem personalizados. Os educadores podem criar os seus próprios cursos, facilitando assim que a aprendizagem possa ser realizada a qualquer hora e em qualquer lugar. O desenvolvimento do sistema foi orientado pela pedagogia construtivista e incorpora um conjunto diverso de ferramentas centradas no estudante, permitindo a criação de ambientes de aprendizagem colaborativa que capacitam e apoiam o ensino e a aprendizagem [64]. Adicionalmente tem suporte para diversos idiomas [64].

8.2 STEM KIT E O MOODLE

A plataforma Moodle foi usada no contexto do Projeto Learn & Fly para disponibilizar os materiais de ensino / aprendizagem produzidos (STEM Kit). Para tal, foi criado e estruturado um curso online, e disponibilizados todos os recursos digitais (incluído os slides STEM Kit slides e todos os documentos complementares), de forma a apoiar os professores na disponibilização do conteúdo, na comunicação com os estudantes e na criação de atividades de aprendizagem e avaliação. Foi também considerado a interação entre estudantes e professores, para tal foi disponibilizado um fórum de comunicação. A plataforma Moodle do Learn&Fly (Figura 71) está disponível a partir do seguinte endereço web: <http://elearning.learn-fly.eu>.



Utilizador não autenticado (Entrar)

Learn & Fly

PORTUGUÊS - PORTUGAL (PT)

READMORE >

About US

The Learn&Fly it's a strategic partnership for school education that addresses underachievement in basic skills related to STEM topics (Science, Technology, Engineering and Mathematics) using innovative and engaging teaching methods related to Aeronautics.

Learn&Fly project will develop educational materials to be used by teachers in different subjects in their classes. Concentrating on the aviation sector, one of the most competitive in Europe, will also contribute to promote entrepreneurship education.

The Learn&Fly STEM Kit exercises and materials will lay on the idea goal of building an airplane with simple materials and then test how it flight. This is a practical and engaging activity, which can be associated to a wider challenge, where students from different schools and even from different countries will collaborate and/or compete and learn at the same time.

The Learn&Fly will also provide concrete information about possible education, training and career paths in the field of aeronautics.

Figura 71. Moodle: Página Inicial do Learn & Fly.

Todos os conteúdos estão disponíveis em quatro idiomas (Figura 10.2) e podem ser acedidos a partir da página inicial do Moodle.



Figura 72. O STEM KIT está acessível em quatro idiomas.

8.2.1 Acesso à plataforma Moodle

Para aceder ao Moodle é necessário que os professores e estudantes tenham credenciais de acesso válidas (as credencias serão enviadas por email a todos os professores e estudantes que tenham sido inscritos na plataforma). Depois do utilizador aceder a <http://elearning.learn-fly.eu>, deve clicar no weblink acessível no canto superior direito - LOG IN (**step 1**), seguidamente deverá preencher na janela de autenticação com os campos de username e password. (**step 2**) e finalmente clicar no botão LOG IN (Figura 73).

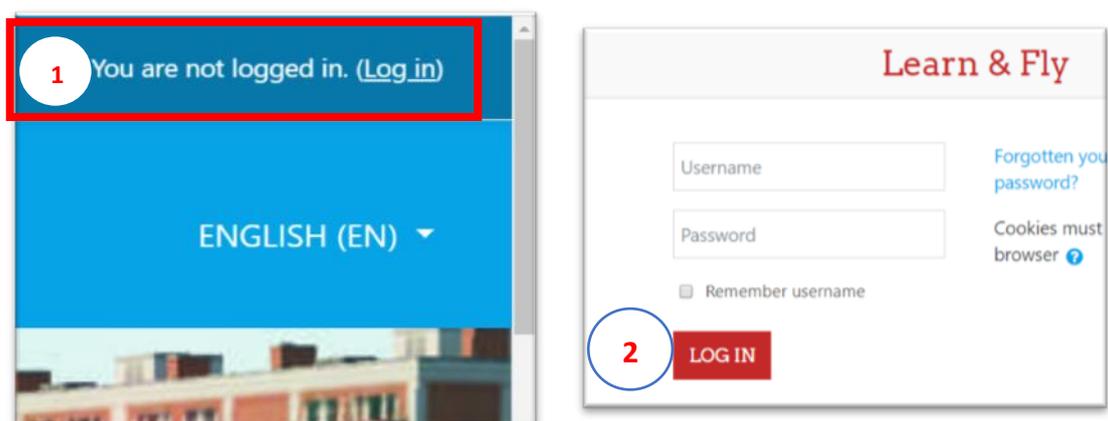


Figura 73. Procedimento de acesso com credenciais válidas.

Após autenticação bem-sucedida, os utilizadores terão acesso à página principal (Figura 10.4).

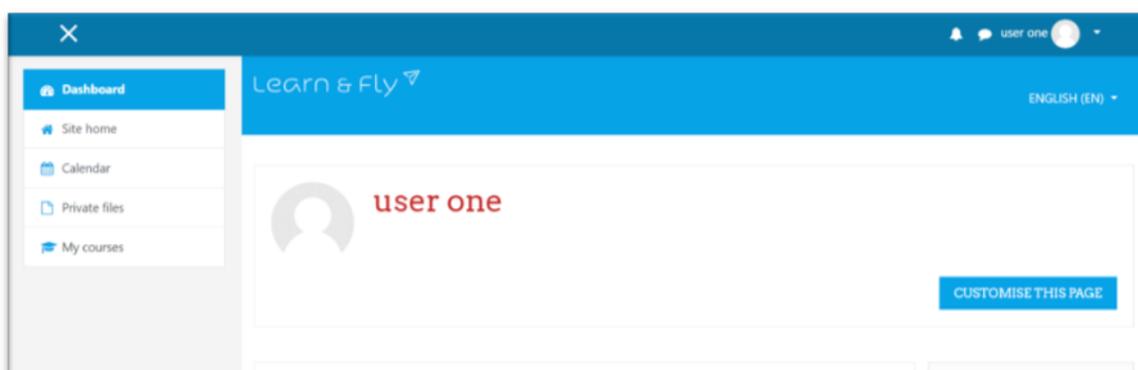


Figura 74. Utilizador autenticado: página principal.

Após autenticação, os utilizadores têm acesso ao seu *Dashboard* e ao seu perfil de utilizador (Figura 75), onde é possível personalizarem alguns dos seus dados pessoais.

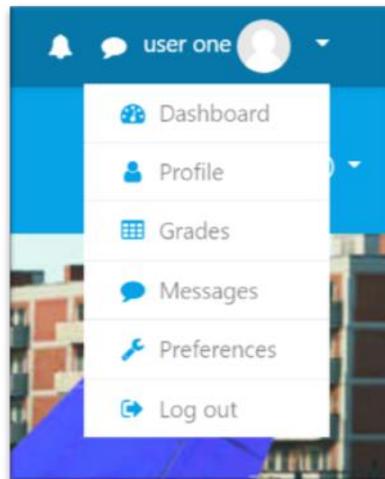


Figura 75. Perfil do utilizador.

As listas de cursos estão visíveis a partir do *Dashboard*, clicando na opção *Site Home* (Figura 10.6). Ao clicar no curso correspondente, os utilizadores terão acesso à página principal do curso STEM Kit, conforme demonstrado na Figura 10.7.

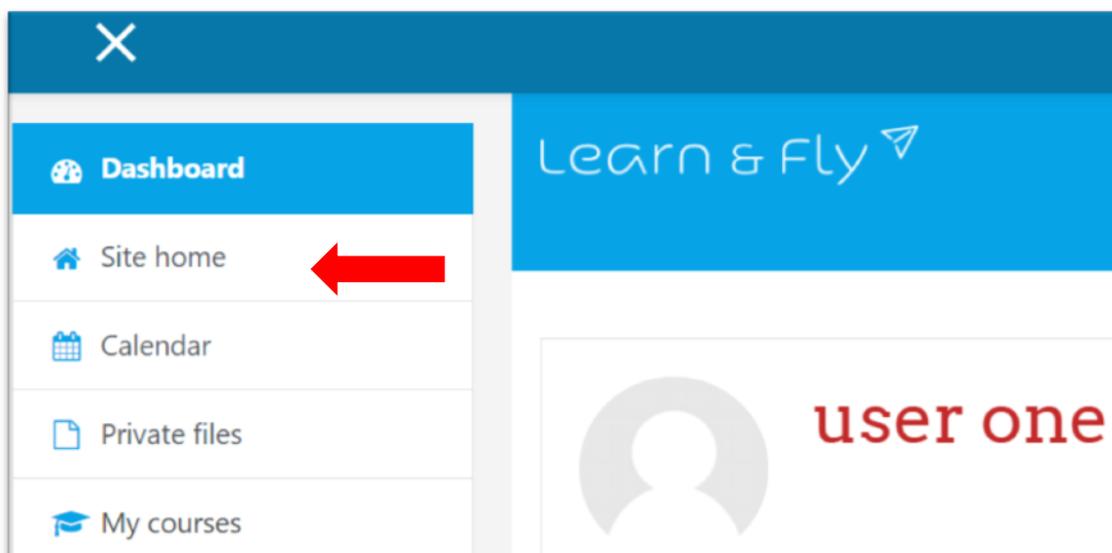


Figura 76. Opções do *Dashboard*.

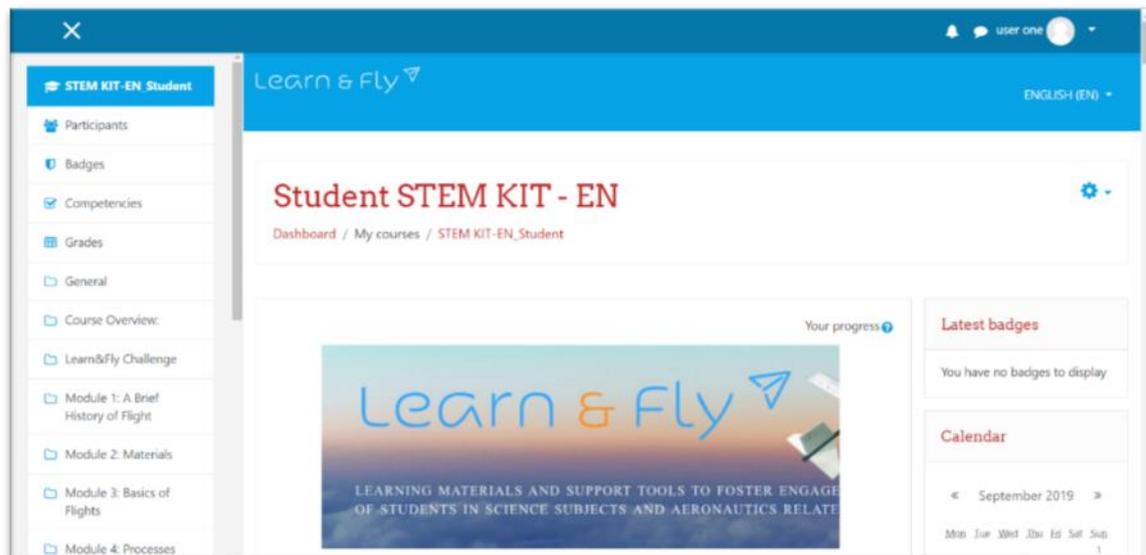


Figura 77. Página principal do curso STEM KIT.

8.3 ESTRUTURA DO CURSO STEM KIT NO MOODLE

O curso está estruturado nas seguintes secções:

- Visão geral do curso
- Desafio Learn & Fly
- Módulo 1: Uma Breve Introdução à História do Voo
- Módulo 2: Materiais
- Módulo 3: Noções Básicas do Voo
- Módulo 4: Processos
- Módulo 5: Desenho Técnico
- Módulo 6: Desenho de Aeronaves
- Módulo 7: Simulação
- Testes
- Get Social

8.3.1 Visão geral do curso

Visão Geral do Curso, é a primeira secção (Figura 78). Informação útil sobre o curso e sobre como navegar nas diversas atividades no Moodle encontram-se presentes nesta secção.

Course Overview:



The STEM-KIT course consists of seven modules, providing you **background to concept, design, improve and build a model aircraft**. At the end you can earn **BADGES**, by answering quizzes related to the course, giving to your team **the opportunity to have extra launches during Learn&Fly Competition**. For more information about quizzes and Badges, please see the [section quizzes](#) below.

Your **REPORT** must be submitted below.

The figure below presents the recommend sequence for the project, however you are free to access any content, in the sequence you want.

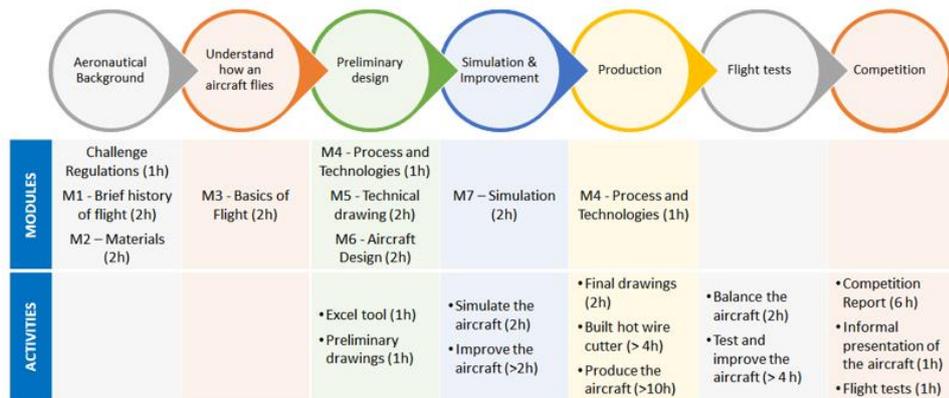


Figura 78. Seção relativa à visão geral do curso.

8.3.2 Seção relativa os regulamentos do Desafio Learn & Fly

A segunda secção fornece aos estudantes e professores informações sobre os Regulamentos do Desafio Learn & Fly e lista os materiais necessários para a construção da aeronave. Os relatórios obrigatórios para aceder aos desafios nacionais e internacionais devem ser submetidos pelos estudantes nesta secção. O upload ocorre quando é clicada a opção: *Challenge Report – Upload or International Challenge Report* (Figura 79).

Learn&Fly Challenge

Below, you can find information about Learn&Fly Challenge Regulations and the kit of materials necessary to built an aircraft.

- Challenge Regulations and Report Template
- Base Kit of materials recommended to build a model aircraft
- Kit of materials supplied for the international challenge
- Challenge Report - Upload

Submit your Challenge Report in **PDF Format until 17th May at 23h55m.**

LearnFly Challenge - Portuguese Teams Results

- International Challenge Report - Upload

Submit your International Challenge Report in English (PDF Format) **until 15th September at 23h55m.**

Figura 79. Secção referente ao Desafio Learn & Fly.

8.3.3 Seção correspondente aos módulo

As **seções 1 a 7** disponibilizam os slides. Todas as secções apresentam a mesma estrutura: **objetivos do módulo** e **conteúdos** relativos ao módulo (Figura 80). Estes conteúdos estão disponíveis em dois formatos: SCORM¹ e ficheiros PDF. O conteúdo SCORM (Figura 81) é apenas acessível online; o PDF pode ser acedido online, mas também é possível fazer o download.



Module 1: A Brief History of Flight

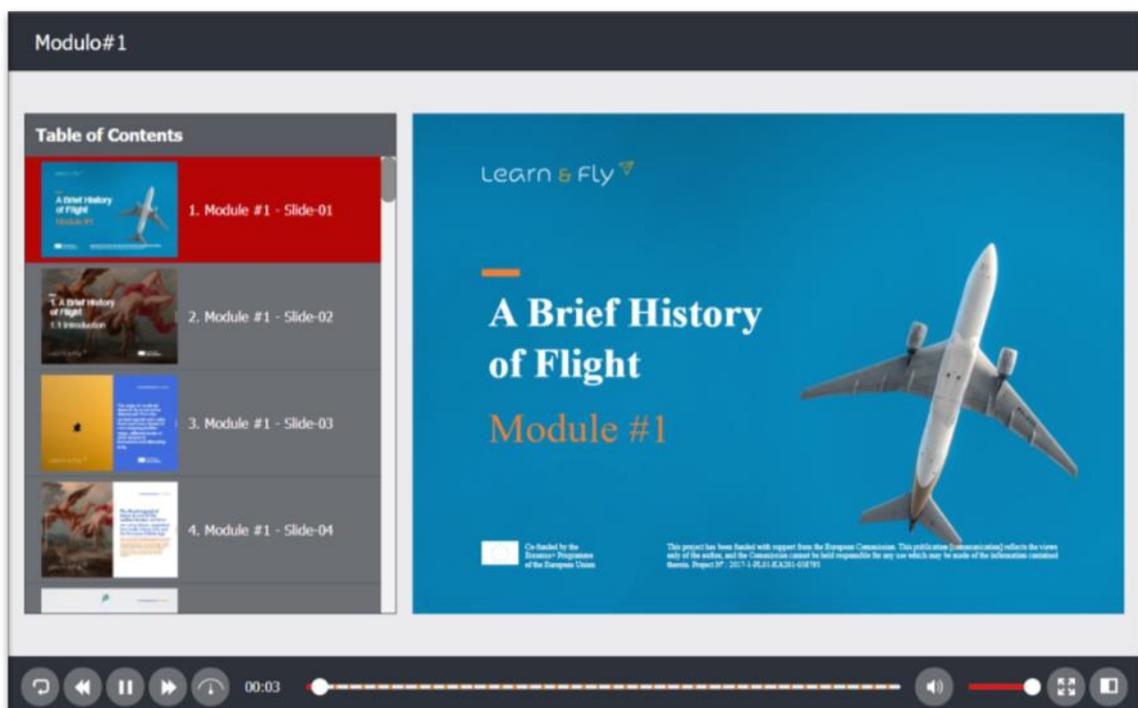
Module Objectives:

The overall objective of this module is to provide a concise perspective about flight pioneers, the aviation saga and flying machines technological evolution, approaching its impact on human life and society to the present.

Contents:

- A Brief History of Flight - Scorm content
- A Brief History of Flight
- A Brief History of Flight - Notebook

Figura 80. Secção referente ao módulo 1 – Uma Breve História do Voo.



Modulo#1

Table of Contents

- 1. Module #1 - Slide-01
- 2. Module #1 - Slide-02
- 3. Module #1 - Slide-03
- 4. Module #1 - Slide-04

Learn & Fly

A Brief History of Flight

Module #1

00:03

Figura 81. Módulo 1: conteúdos disponíveis em formato SCORM.

¹ Sharable Content Object Reference Model (SCORM).

8.3.4 Seção: testes

A Seção **Testes** apresenta três atividades de avaliação (Figura 10.12), onde os estudantes são convidados a responder a um conjunto diverso de questões de modo a testar / validar o seu conhecimento sobre os conteúdos abordados nos vários módulos do STEM KIT. Figura 10.13 mostra um exemplo.

Quizzes

Quizzes are group activity, i.e. one of the members answers for the group. Please, see the criteria defined to the quizzes and badges, in the table below. If you complete successfully the 3 quizzes you earn the badge "Aeronautical Engineering".

Quizzes	Modules	Badges	Criteria
Quiz#1	Mod#1 - Brief History of Flight Mod#2 - Materials	 Materials Expert	For each quiz: Min Score: 75% Attempts: 2 Attempt time limit: 20m Note: All quizzes have 20 questions multiple choice or True/False
Quiz#2	Mod#3 - Basics of Flight Mod#4 - Processes and Technologies Mod#6 - Aircraft Design	 Mechanics Expert	
Quiz#3	Mod#5 - Drawings Mod#7 - Simulation	 Simulation Expert	



Figura 82. Seção relativa aos testes. A lista de medalhas disponíveis também é mostrada.

Question 1
Not yet answered
Marked out of 1.00
Flag question
Edit question

The main advantages of the use of composites in the construction of aircraft are:

Select one:

- a. Easy machining, assemblage and painting.
- b. High specific strength, high damage tolerance and easy assemblage.
- c. High impact resistance and low damage tolerance.

Quiz navigation

1	2	3	4	5
6	7	8	9	10
11	12	13	14	15
16	17	18	19	20

Finish attempt ...

Time left 0:19:40

[START A NEW PREVIEW](#)

Question 2
Not yet answered
Marked out of 1.00
Flag question
Edit question

The Montgolfier brothers launch the first balloon flight with humans on board.

Select one:

- a. True
- b. False

Figura 83. Exemplo de um teste online.

8.4 Secção Get Social

A secção final convida os alunos a partilhar as suas conquistas e atividades nas redes sociais (Figura 84).

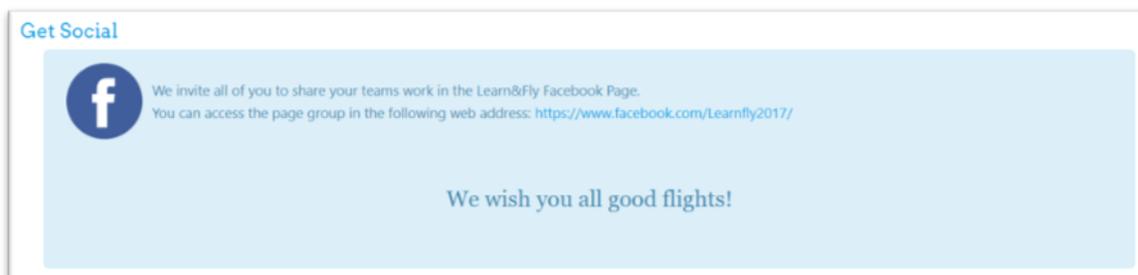


Figura 84. Secção Get Social.

8.5 O curso STEM KIT e a Gamificação

A Gamificação é o processo de incorporar elementos de jogo em contextos de não jogo [65]. Os elementos do jogo são caracterizados pelo uso de pontos, medalhas, níveis, barras de progresso, moeda virtual, avatares, entre outros, e implementações comuns de gamificação aplicam esses elementos em contexto de aprendizagem [65]. Nos últimos anos, a gamificação atraiu a atenção de muitos investigadores de diferentes áreas, como marketing, saúde, desporto e educação. A sua aplicação em contexto educativo visa aumentar o envolvimento dos utilizadores com as atividades de aprendizagem [66].

Nesse sentido, os elementos medalhas (Figura 82) foram integradas nas atividades Teste como recompensa do desempenho alcançado no curso Learn & Fly. Pretendeu-se assim motivar os estudantes a interagir com os conteúdos do STEM KIT. Em cada teste, os estudantes têm um máximo de duas tentativas e um limite de vinte minutos para submeter suas respostas. Se a pontuação mínima de 75% for atingida num dos testes, os estudantes ganham medalhas. Se os estudantes obtiverem as três medalhas, terão acesso à medalha final de "Engenharia Aeronáutica", que permitirá aos estudantes lançamentos extra nos desafios. Toda esta informação está descrita no documento Regulamentos do Desafio, disponível na secção correspondente no Moodle.

Todos as medalhas obtidas ficam visíveis para os estudantes no seu perfil de utilizadores.

8.5.1 Medalhas – Como podem os Professores consultar as medalhas obtidas pelos estudantes

- Na página principal do curso  (Figura 85).

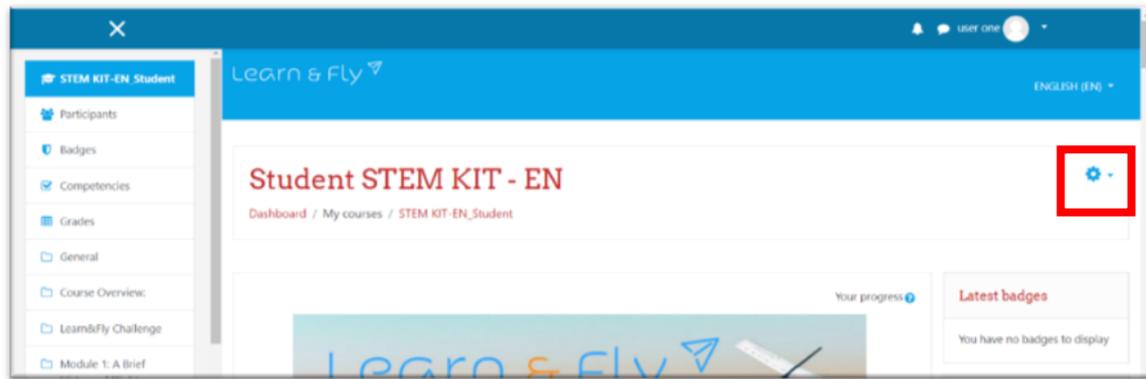


Figura 85. Como visualizar as medalhas a partir da página principal.

- Seguidamente, na página de administração do curso selecionar as opções **Gerir medalhas** (manage badges) (Figura 86).

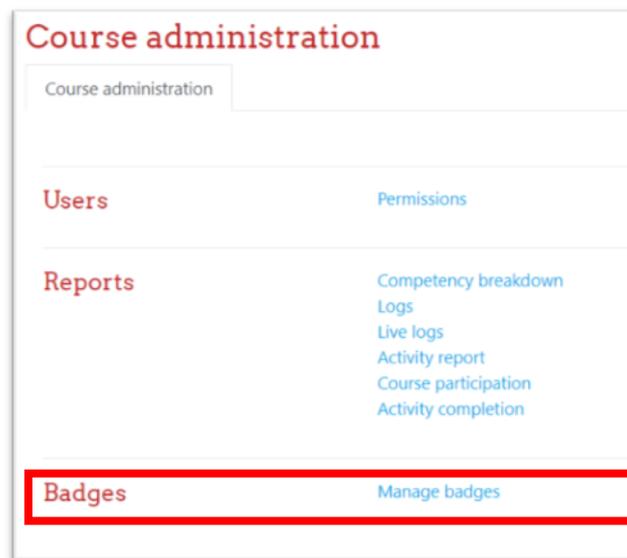
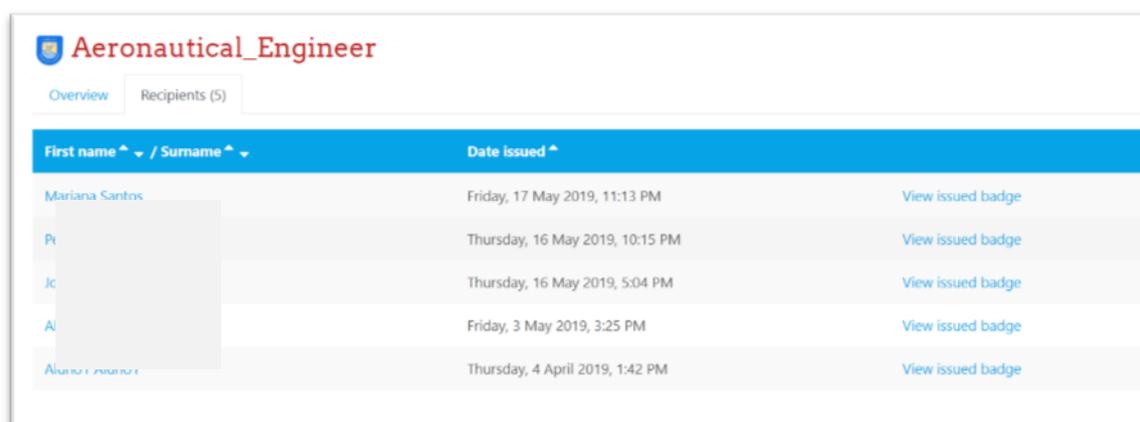


Figura 86. Como fazer a gestão das medalhas a partir da página de administração do curso.

- Depois de clicar em **Gerir Medalhas** (Manage Badges), uma tabela com todas as medalhas disponíveis é visualizada (Figura 10.17).
- Para visualizar o nome dos estudantes que ganharam medalhas, clicar no número que correspondente a cada medalha (Figura 87) para obter a lista de todos os estudantes, (Figura 88).

Name	Badge status	Criteria	Recipients	Actions
Aeronautical_Engineer	Available to users	• Complete ALL of: "Materials_Expert", "Mechanics_Expert", "Simulation_Expert"	5	
Aeronautical_Engineer - International	Available to users	• Complete ALL of: "Materials_Expert - International", "Mechanics_Expert - International", "Simulation_Expert - International"	1	

Figura 87. Medalhas disponíveis.



The screenshot shows a Moodle page for 'Aeronautical_Engineer' with a 'Recipients (5)' tab selected. Below the header is a table listing badge recipients with columns for 'First name / Surname' and 'Date issued'. Each row includes a 'View issued badge' link.

First name ^ v / Surname ^ v	Date issued ^	
Mariana Santos	Friday, 17 May 2019, 11:13 PM	View issued badge
Pr	Thursday, 16 May 2019, 10:15 PM	View issued badge
JC	Thursday, 16 May 2019, 5:04 PM	View issued badge
Al	Friday, 3 May 2019, 3:25 PM	View issued badge
Alvaro	Thursday, 4 April 2019, 1:42 PM	View issued badge

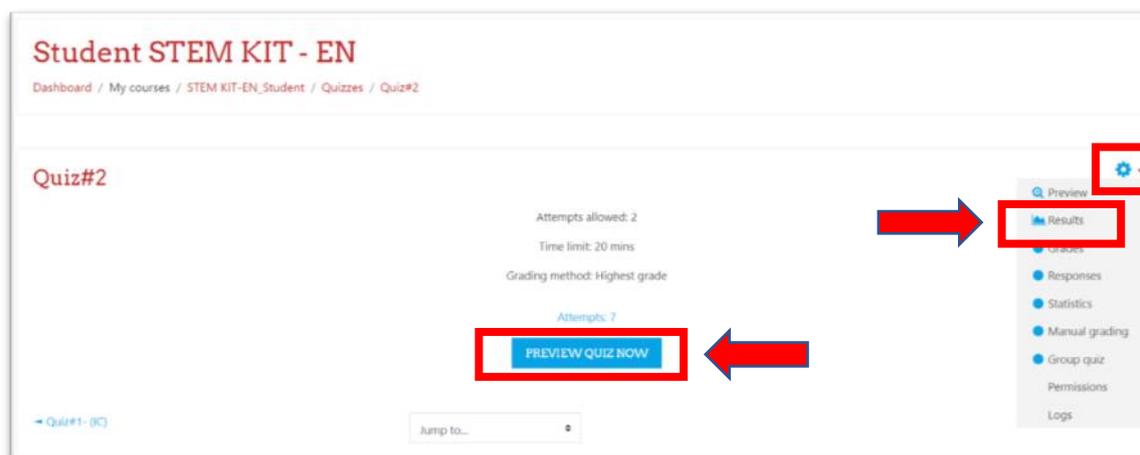
Figura 88. Lista de estudantes que ganharam medalhas.

8.5.2 Testes Online (quizzes) – Como consultar os resultados dos testes

Para aceder ao ecrã dos resultados, os professores devem seleccionar a atividade de teste (Quiz#1, Quiz#2, or Quiz#3) na secção dos testes online. Seguidamente o ecrã das **tentativas** (attempts) ficará disponível, mostrando duas opções para consultar os resultados (Figura 89):

- Clicar na opção tentativas (attempts) ou,
- Clicar em 

Seguidamente um menu em dropdown com variadas opções fica visível. Clicar na opção Resultados (results).



The screenshot shows the 'Quiz#2' page for 'Student STEM KIT - EN'. It displays quiz details: 'Attempts allowed: 2', 'Time limit: 20 mins', and 'Grading method: Highest grade'. A 'PREVIEW QUIZ NOW' button is highlighted with a red box and a red arrow pointing to it. On the right, a dropdown menu is open, with the 'Results' option highlighted by a red box and a red arrow pointing to it. A gear icon at the top right of the menu is also highlighted with a red box.

Figura 89. Resultados dos testes online.

Depois de seleccionar as opções, o ecrã com os resultados fica visível, onde é possível visualizar os resultados por nome de estudante (Figura 90).

Os professores têm a opção de fazer o download dos resultados em formato excel ou em outros formatos disponíveis para o efeito. Os professores devem seleccionar em qual dos formatos pretendem fazer o download e seguidamente clicar na opção **Download**.

Student STEM KIT - EN

Dashboard / My courses / STEM KIT-EN_Student / Quizzes / Quiz#2 / Results / Grades

Quiz#2

Attempts: 7

Display options

Page size: 30

Marks for each question: Yes

SHOW REPORT

REGRADE ALL DRY RUN A FULL REGRADE

Showing graded and ungraded attempts for each user. The one attempt for each user that is graded is highlighted. The grading method for this quiz is Highest grade.

Download table data as: Comma separated values DOWNLOAD

name / Surname	Email address	State	Started on	Completed	Time taken	Grade/20.00	Q. 1	Q. 2	Q. 3	Q. 4	Q. 5	Q. 6	Q. 7	Q. 8	Q. 9	Q. 10	Q. 11	Q. 12	
Aluno 1	learnfly2017@gmail.com	Finished	4 April 2019 1:30 PM	4 April 2019 1:39 PM	9 mins 47	20.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00

Figura 90. Resultados dos Testes Online por nome de estudante.

8.6 Relatórios do Desafio - UPLOAD E DOWNLOAD

Nesta secção, ilustramos como fazer o upload do relatório para a plataforma Moodle, e como podem os professores ter acesso aos relatórios dos estudantes.

8.6.1 Upload do Relatório pelos estudantes

Para aceder, clicar nas atividades disponíveis na secção **Learn&Fly Challenge** (Figura 91).

Learn&Fly Challenge

Below, you can find information about Learn&Fly Challenge Regulations and the kit of materials necessary to built an aircraft.

Challenge Regulations and Report Template

Base Kit of materials recommended to build a model aircraft

Kit of materials supplied for the international challenge

Challenge Report - Upload

Submit your Challenge Report in PDF Format until 17th May at 23h55m.

LearnFly Challenge - Portuguese Teams Results

International Challenge Report - Upload

Submit your International Challenge Report in English (PDF Format) until 15th September at 23h55m.

Figura 91. Upload dos Relatórios.

Se os estudantes estiverem a realizar o upload do relatório para o desafio internacional, devem clicar no botão **Add Submission** (Figura 92).

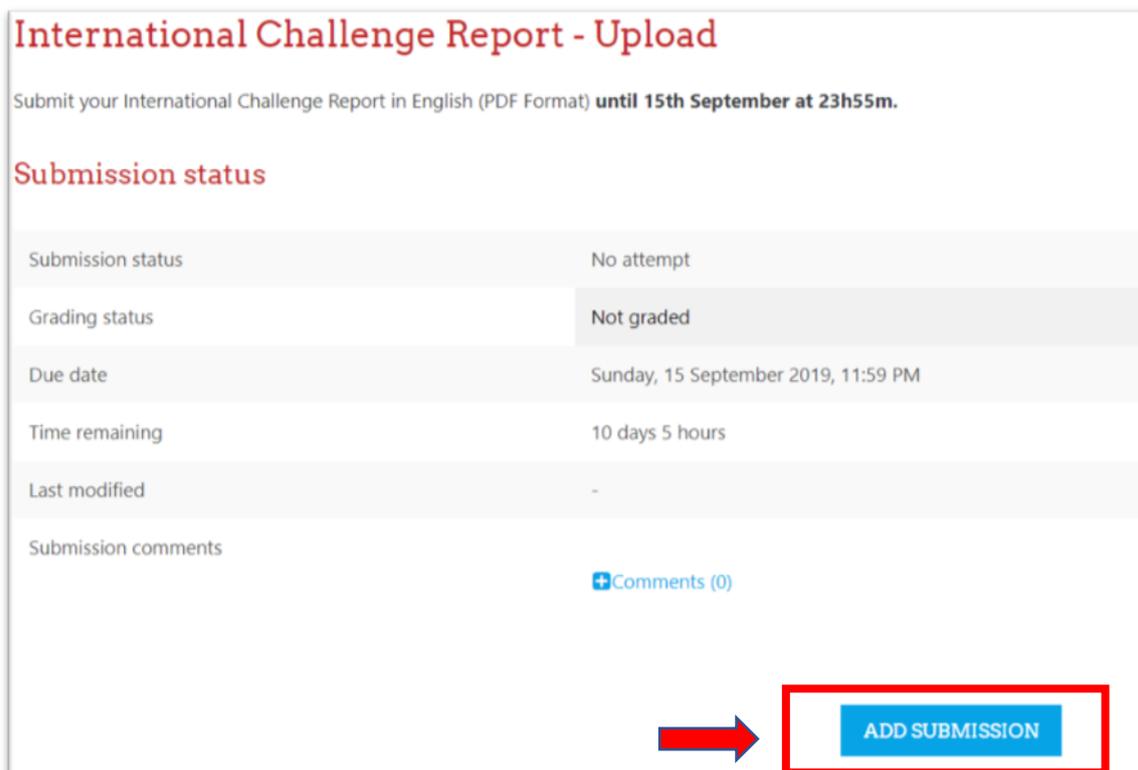


Figura 92. Adicionar uma nova submissão – passo 1.

- Na janela correspondente ao **File Submissions** os estudantes devem efetuar o arrastar e largar (drag and drop) do ficheiro dentro da área de texto (Figura 10.23). O número de ficheiros permitidos depende da atividade.
- Para finalizar as submissões os estudantes devem clicar no botão **Save Changes** (guardar alterações).

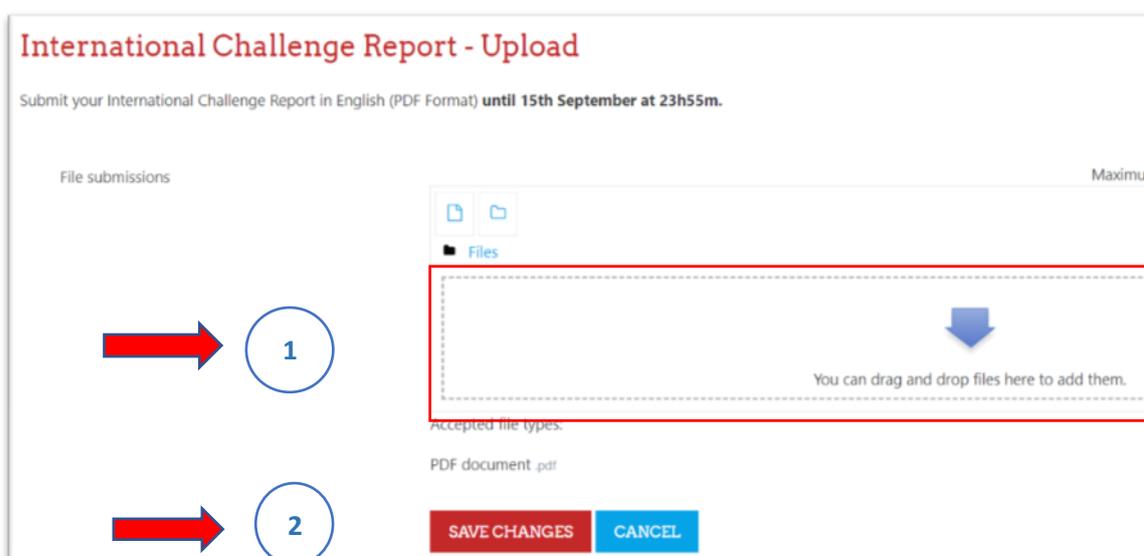


Figura 93. Adicionar uma nova submissão – passo 2.

O estado da submissão (**Submission status**) pode ser visualizado na janela (**Challenge Report Upload**).

8.6.2 Download dos Relatórios pelos professores

Na écran de Challenge Report, clicar em (ver todas as submissões) **View All Submissions**, (Figura 94).

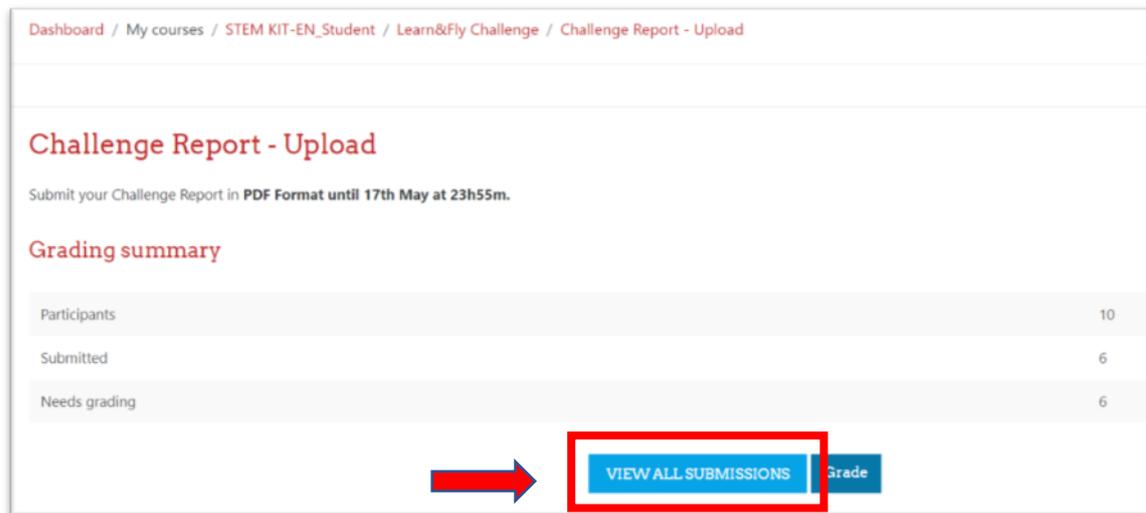


Figura 94. Professores: Efetuar o download dos relatórios. Passo 1: view submissions.

Na janela seguinte, Grading Window, o professor tem duas opções para efetuar o download dos relatórios (Figura 95):

- Clicando diretamente no ficheiro ①;
- Clicando em Grading action e escolher a opção Download all submissions ②.

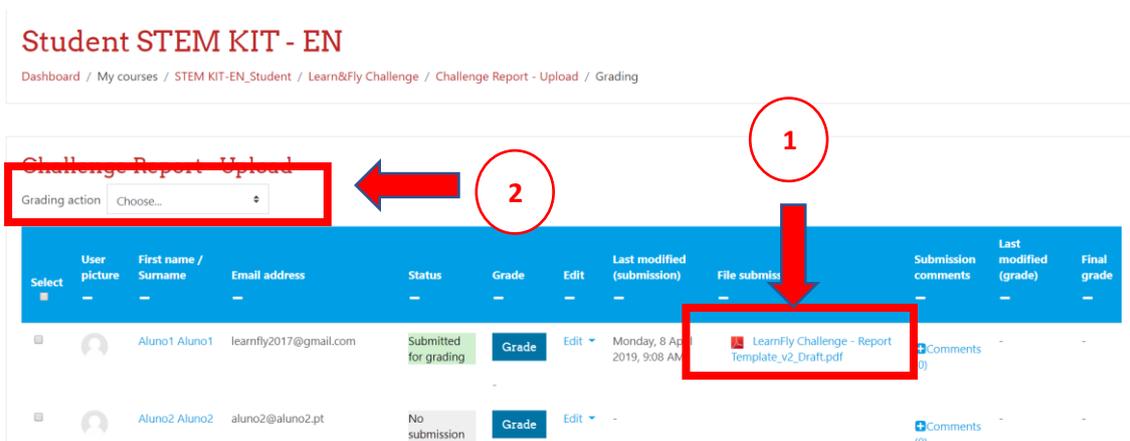


Figura 95. Professores: download dos relatórios. Passo 2: grading reports.

REFERÊNCIAS

- [1] T.D. Crouch, *Wings, A History of Aviation from Kites to the Space Age*, Norton, New York, 2003.
- [2] R.G. Grant, *Flight: the Complete History of Aviation.*, Dorling Kindersley Limited, London, 2017.
- [3] International Organization for Standardization, *Standard Atmosphere*, ISO 2533:1975, 1975.
- [4] P. Letcher, *Eccentric France*, Bradt Travel Guides, 2003.
- [5] C. Williams, B. Blond, *New York State*. Lonely Planet. p. 86. ISBN 978-1-74104-125-5., Lonely Planet, 2004.
- [6] D. McCullough, *The Wright Brothers*, Simon & Schuster, 2015.
- [7] S.I. Weiss, A.R. Amir, *Aerospace industry*, *Enycl. Br.* (2019). <https://www.britannica.com/technology/aerospace-industry> (accessed July 29, 2019).
- [8] Y. Gibbs, *NASA Armstrong Fact Sheet: Helios Prototype*, 2014.
- [9] J.C. Naftela, *NASA Global Hawk: A Unique Capability for the Pursuit of Earth Science*, *NASA Tech. Memo. 2007–21461* (2017).
- [10] R.E. Hummel, *Understanding Materials Science: History, Properties, Applications*, 2nd ed, Springer-Verlag, New York, 1998.
- [11] J. Newell, *Essentials of Modern Materials Science and Engineering*, John Wiley & Sons, 2009.
- [12] L.L. Hench, *Bioceramics: From Concept to Clinic*, *J. Am. Ceram. Soc.* 74 (1991) 1487–1510. doi:10.1111/j.1151-2916.1991.tb07132.x.
- [13] K.K. Chawla, *Mechanical Behavior of Materials*, Cambridge University Press, 2009.
- [14] I. Polmear, *Light Alloys: From Traditional Alloys to Nanocrystals*, Butterworth-Heinemann, 2005.
- [15] P.L. Jakab, *Wood to Metal: The Structural Origins of the Modern Airplane*, *J. Aircr.* 36 (1999) 914–918.
- [16] M. Kreßl, *Wood in aircraft construction*, University of Natural Resources and Applied Life Sciences, Vienna, 2009.
- [17] C. Stewart, *Nickel-Based Super Alloys*, *INSG Insight.* 20 (2013) 1–9.
- [18] S.P. Brookes, *Thermo-mechanical fatigue behaviour of the near- γ -titanium aluminide alloy TNB-V5 under uniaxial and multiaxial loading*, PhD Thesis. AM Bundesanstalt Für Mater. Und Prüfung. (2009).
- [19] W.W. Wright, *Polymers in aerospace applications*, *Materials&Design.* 12 (1991) 222–227.
- [20] J. Cheng, H. Ji, J. Qiu, T. Takagi, T. Uchimoto, N. Hu, *Novel electromagnetic modeling approach of carbon fiber-reinforced polymer laminate for calculation of eddy currents and eddy current testing signals*, *J. Compos. Mater.* 49 (2015) 617–631. doi:10.1177/0021998314521475.
- [21] W.. Wright, *Polymers in aerospace applications*, *Mater. Des.* 12 (1991) 222–227. doi:10.1016/0261-3069(91)90169-5.
- [22] FAA, *Aviation Maintenance Technician Handbook–General (FAA-H-8083-30A)*, U.S. Department of Transportation, Federal Aviation Administration, Airman Testing Standards Branch, Oklahoma City, 2008.
- [23] D.F. Anderson, S. Eberhardt, *Understanding Flight*, McGraw-Hill, 2001.
- [24] S.M. Meredith, – *Science in the Real World: How Do Aircraft Fly?*, Chelsea House Publishers, 2010.
- [25] N.T. Roskan, C.-T. Lan, *Airplane Aerodynamics and Performance*, Design, Analysis and Research Corporation, 1997.
- [26] FAA, *Pilot’s Handbook of Aeronautical Knowledge – (FAA-H-8083-25)*, 2003.
- [27] FAA, *Weight and Balance Handbook (FAA-H-8083-1B)*, 2016.
- [28] H. Balaji, P. Selvaraj, V.S. Rao, *Trends In Manufacturing And Assembly Technologies For*

- Next Generation Combat Aircraft, *ARPN J. Eng. Appl. Sci.* 9 (2014) 667–673.
- [29] Desktop Aeronautics, *Aircraft Design: Synthesis and Analysis*, 2001.
- [30] A. Gómez, V. Olmos, J. Racero, J. Ríos, R. Arista, F. Mas, Manufacturing of Custom-made Parts for Assembly of Large Aircraft Components, *Procedia Eng.* 132 (2015) 1006–1013. doi:10.1016/J.PROENG.2015.12.589.
- [31] K. Lange, *Handbook of Metal Forming*, McGraw-Hill, 1985.
- [32] B. Jin, K. Neidert, M. Ellis, Sustainable and Efficient Hydroforming of Aerospace Composite Structures, in: R.K. Agarwal (Ed.), *Environ. Impact Aviat. Sustain. Solut.*, Intechopen, 2019: pp. 1–39.
- [33] R. Pasko, L. Przybylski, B. Slodki, High Speed Machining (HSM) – The Effective Way Of Modern Cutting, in: *Proc. Int. Work. CA Syst. Technol.*, 2002: pp. 72–79.
- [34] M. Whitmore, EDM in the Aircraft Industry, *Aircr. Eng. Aerosp. Technol.* 56 (1984) 2–4. doi:10.1108/eb035964.
- [35] A. Crosky, C. Grant, D. Kelly, X. Legrand, G. Pearce, Fibre placement processes for composites manufacture, *Adv. Compos. Manuf. Process Des.* (2015) 79–92. doi:10.1016/B978-1-78242-307-2.00004-X.
- [36] J. Sloan, Taking the hand out of hand layup, *Compos. World.* 6 (2016) 1–5.
- [37] J. Sloan, Evolving AFP for the next generation, *Compos. World.* 5 (2019) 26–29.
- [38] I. Gibson, D. Rosen, B. Stucker, *Additive Manufacturing Technologies*, 2nd ed., Springer Science & Business Media, New York, 2015.
- [39] S. Singamneni, L. V. Yifan, A. Hewitt, R. Chalk, W. Thomas, D. Jordison, Additive Manufacturing for the Aircraft Industry: A Review, *J. Aeronaut. Aerosp. Eng.* 8 (2019) 1000214–1000227.
- [40] A. Silva, C.T. Ribeiro, J. Dias, L. Sousa, *Desenho Técnico Moderno* (in portuguese), 7th ed., Lidel, Lisboa, 2004.
- [41] SAE International, AS9012 - Aerospace First Article Inspection Requirement, 2000.
- [42] International Organization for Standardization, ISO 128-1:2003 Technical drawings - General principles of presentation - Part 1: Introduction and index, Genève, 2003.
- [43] International Organization for Standardization, ISO 128-20:1996 Technical drawings - General principles of presentation - Part 20: Basic conventions for lines, Genève, 1996.
- [44] International Organization for Standardization, ISO 128-30:2001 Technical drawings- General principles of presentation-Part 30: Basic conventions for views, Genève, 2001.
- [45] International Organization for Standardization, ISO 128-40:2001 Technical drawings- General principles of presentation-Part 40: Basic conventions for cuts and sections, Genève, 2001.
- [46] International Organization for Standardization, ISO/TS 128-71:2010 Technical product documentation (TPD)-General principles of presentation-Part 71: Simplified representation for mechanical engineering drawings, Genève, 2010.
- [47] International Organization for Standardization, ISO 128-24:2014 Technical drawings— General principles of presentation—Part 24: Lines on mechanical engineering drawings, Genève, 2014.
- [48] International Organization for Standardization, ISO 216:2017 Writing paper and certain classes of printed matter - Trimmed sizes - A and B series, and indication of machine direction, Genève, 2017.
- [49] International Organization for Standardization, ISO 5457:1999 Technical product documentation - Sizes and layout of drawing sheets, Genève, 1999.
- [50] International Organization for Standardization, ISO 3098/1:1974 Technical Drawing - Lettering - Part I: Currently Used Characters, Genève, 1974.
- [51] International Organization for Standardization, ISO 129-1:2018 Technical product documentation (TPD) - Presentation of dimensions and tolerances - Part 1: General principles, Genève, 2018.
- [52] P. Weaver, Henry L. Gantt A Retrospective view of his work. Available on-line

- https://www.mosaicprojects.com.au/Resources_Papers_158.html, (2014).
- [53] A. Ertas, J. Jones, *The Engineering Design Process*, 2nd ed, ohn Wiley & Sons, New York, 1996.
- [54] L.Y. Ljungberg, *Materials selection and design for development of sustainable products*, *Mater. Des.* 28 (2007) 466–479. doi:10.1016/J.MATDES.2005.09.006.
- [55] C.V.S. Kumar, S. Routroy, *Demystifying Manufacturer Satisfaction through Kano Model*, *Mater. Today Proc.* 2 (2015) 1585–1594. doi:10.1016/J.MATPR.2015.07.085.
- [56] P. Marzocca, *The NACA airfoil series*, available online: <https://people.clarkson.edu/~pmarzocc/AE429/The%20NACA%20airfoil%20series.pdf>, Clarkson University, 2016.
- [57] FAA, *Glider Flying Handbook*, FAA-H-8083-13A, 2013.
- [58] S. Strogatz, *The End of Insight*, in: J. Brockman (Ed.), *What Is Your Danger. Idea?*, Harper Collins, 2007.
- [59] D. Allerton, *Principles of Flight Simulation*, Wiley, 2009.
- [60] Laminar Research, *X-Plane11*, (n.d.). <https://www.x-plane.com>.
- [61] Laminar Research, *X-Plane11 Desktop Manual*, version 11.30, (2019).
- [62] Laminar Research, *Plane Maker Manual*, version 11.30, (2019). <https://developer.x-plane.com/manuals/planemaker>.
- [63] Laminar Research, *WorldEditor Manual*, 2019. (n.d.).
- [64] Moodle Community, *About Moodle*. Available online: <https://www.moodle.org>. [Accessed: 03-Set-2019]., (n.d.).
- [65] S. Deterding, D. Dixon, R. Khaled, L. Nacke, *From Game Design Elements to Gamefulness: Defining “Gamification,”* in: *Proc. 15th Int. Acad. MindTrek Conf. Envisioning Futur. Media Environ., ACM, New York, NY, USA, 2011: pp. 9–15.* doi:10.1145/2181037.2181040.
- [66] K. Werbach, D. Hunter, *The Gamification Toolkit: Dynamics, Mechanics, and Components for the Win*, Wharton Digital Press, 2015.
- [67] International Civil Aviation Organization, *Convention on International Civil Aviation*, (2017). <https://www.icao.int/publications/pages/doc7300.aspx> (accessed July 29, 2019).



STEM KIT

Manual do Professor

www.learn-fly.eu



Co-financiado por
Programa Erasmus+
da União Europeia

Este projeto foi financiado com o apoio da Comissão Europeia. Esta publicação [comunicação] vincula exclusivamente o autor, não sendo a Comissão responsável pela utilização que dela possa ser feita.
Projeto N.º: 2017-1-PL01-KA201-038795