

METROLOGIA EM AERONAUTICA

por

Luís Manuel Braga da Costa Campos

do

Instituto Superior Técnico – Professor Catedrático
Coordenador dos cursos de Engenharia Aeroespacial:
(Mestrado Integrado e Doutoramento)

Director do Centro de Ciências e Tecnologias Aeronáuticas
e Espaciais

no

Dia Mundial da Metrologia

22 de Maio de 2017

em

- Instituto Português da Qualidade

(IPQ)

1 – VARIEDADE DE MEDIÇÕES

* As medições são essenciais em todas as fases de um programa aeronáutico:

- Projecto e desenvolvimento
- Ensaios em voo e certificação
- Fabrico e controlo de qualidade
- Operações, manutenção e reparação

* Cobrem muitos domínios

- Mecânica dos fluidos: Aerodinâmica e Propulsão
- Mecânica dos sólidos: Estruturas e Materiais
- Sistemas Eléctricos e Electrónicos
- Dinâmica e Controlo.

- * Usam meios sofisticados, requerem grande precisão, são realizadas em ambientes diversos: em voo, em gases quentes, baixas e altas pressões,....
 - * O tema é vasto e será abordado pela 'via cronológica' da história de um programa aeronáutico' da concepção à operação
 - * Exemplo escolhido: jacto comercial tipo Airbus (A350) ou Boeing (787)
 - * outros: aviões militares, helicópteros, drones, satélites, lançadores

2 – MERCADO COMERCIAL

- * Aviões de transporte a jacto com mais de 150 passageiros Airbus ou Boeing
- * Custo de desenvolvimento de novo avião ≥ 10 B€
 - Tempo de desenvolvimento ≥ 5 anos
 - Ensaios em voo de certificação ≥ 3000 h
- * Preço de um avião: 100 – 400 M€
 - Produção anual ~ 1000
 - Volume de negócios anual: 200 B€
- * Caderno de encomendas
 - Numero de produção: 5 anos
 - Valor das encomendas: 1 T€

3 – ESPECIFICAÇÕES DE PROJECTO

Exemplo de um avião comercial Airbus A350 ou Boeing B787

* algumas especificações – ordens de grandeza.

- Capacidade de passageiros: 300;
- Velocidade de cruzeiro: 1000 km/h;
- Altitude de cruzeiro: 11 km;
- Alcance: 14 000 km;
- Consumo de combustível: 3 l/passageiro km

* Descolagem e aterragem:

- Comprimento da pista: 3 000 m
- Temperatura ambiente 40 C
- Altitude barométrica: 3 000 m

* Outros: nível de ruído

Normas de segurança

Qualidades de pilotagem

Resistência do motor no impacto de um pássaro de 2 kg

Evacuação da cabine em 90 segundos etc...

4 – CONFIGURAÇÕES DE AVIÃO

Princípio do voo
do mais pesado
que o ar :

Sir George Cayley
(1860)

Voo de cruzeiro:

Sustentação = peso

Impulso = resistência

*configuração classica:

- Asa para sustentação
- Fuselagem para carga
- Superfícies de controle

* Asa voadora

- muito eficiente
- grande volume interno
- incertezas de projecto

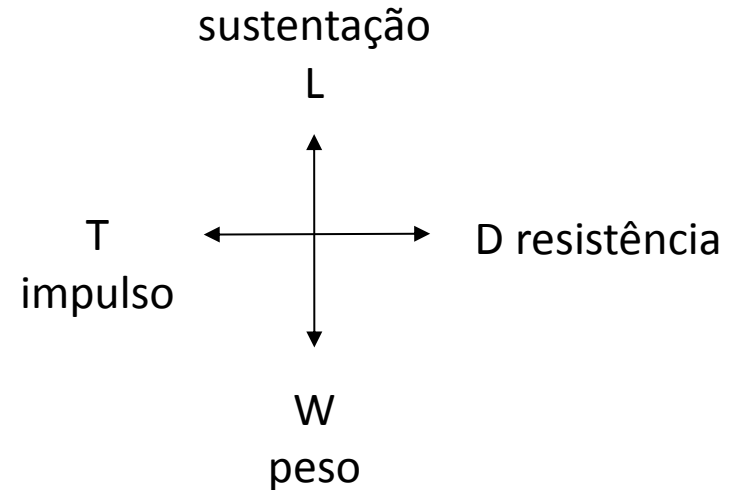


Figure 1- Airbus A350

Figure 2- Asa voadora



© AIRBUS S.A.S. 2017 - computer rendering by FIXION - photo by dreamstime.com - MMS

AIRBUS



5 – GARANTIAS E PENALIZAÇÕES

Custo de um avião: 100 – 400 M€

Amortização possível por redução dos custos de operação

Redução do consumo de combustível de pelo menos 10-12% em cada nova geração

* Garantia de consumo de combustível:

- precisão de 1%.

- penalização por excesso de consumo:

* Consumo de combustível = impulso do motor

X consumo específico

* Fabricante do avião: garantia de < 1 % na resistência aerodinâmica = impulso do motor

* Fabricante do motor: garantia de < 1 % no concurso específico: kg de combustível por kg de impulso numa hora

6 - PROJECTO AERODINÂMICO

- * Garantia de resistência aerodinâmica com precisão de 1%.
- * Projecto aerodinâmico: Mecânica de Fluidos Computacional (CFD)
- * Verificação experimental: turbulência, separação, ondas de choque
- * Modelo testado em túnel aerodinâmico em várias posições (ângulos de ataque e deriva) para medir :
 - Forças e momentos
 - Distribuição de pressão sobre modelo
 - Ruído
 - Escoamento em torno do modelo
- * Similitude-números adimensionais

Mach

$$M = \frac{V}{c}$$

V – velocidade do ar

c – velocidade do som

Reynolds

$$Re = \frac{\rho VL}{\mu}$$

ρ – densidade

μ – viscosidade

L – dimensão

7 – TUNEIS AERODINÂMICOS: S1 E ETW

FIGURE 3: Modane S1

- Diâmetro: 8 m
- Velocidade: 1 000 km/h
- Potência: 88 MW
- Local: Alpes franceses
- Motivo: barragem dedicada
- Albufeira: 1 km de desnível
- Fonte de energia: hidráulica
- Correcto: Mach
- Incorrecto: Reynolds



Model of the satellite in the museum.

FIGURE 4: ETW European Transsonic Wind tunnel

- Mach e Reynold correctos
- Pressão: 4 bar
- Temperatura: 100 K (azoto liquido)
- Velocidade do som mais baixa
- Densidade maior
- Arrefecer e pressurizar antes do teste
- Modelo suporta pressão alta e temperatura baixa
- Instrumentação funciona nas mesma condições



8 – MOTOR TIPO TURBOFAN

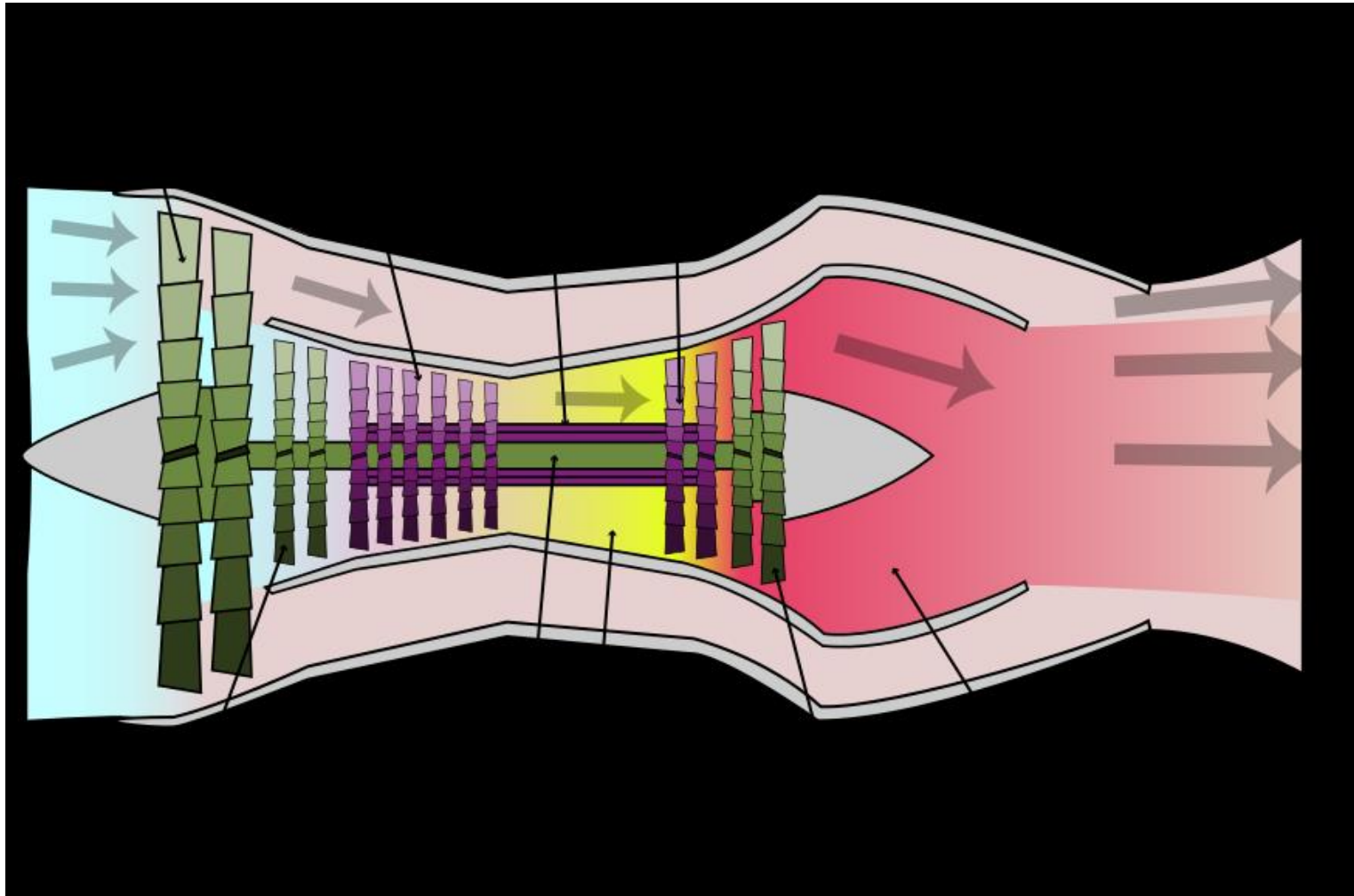
FIGURA 5 – Turbofan

* Componentes:

- Fan: compressor de baixa pressão
- Compressor de alta pressão: 30:1
- Camara de combustão: 2 000 K
- Turbina de alta pressão: 10 000 rpm
- Turbina de baixa pressão.

* Pás da turbina de alta pressão:

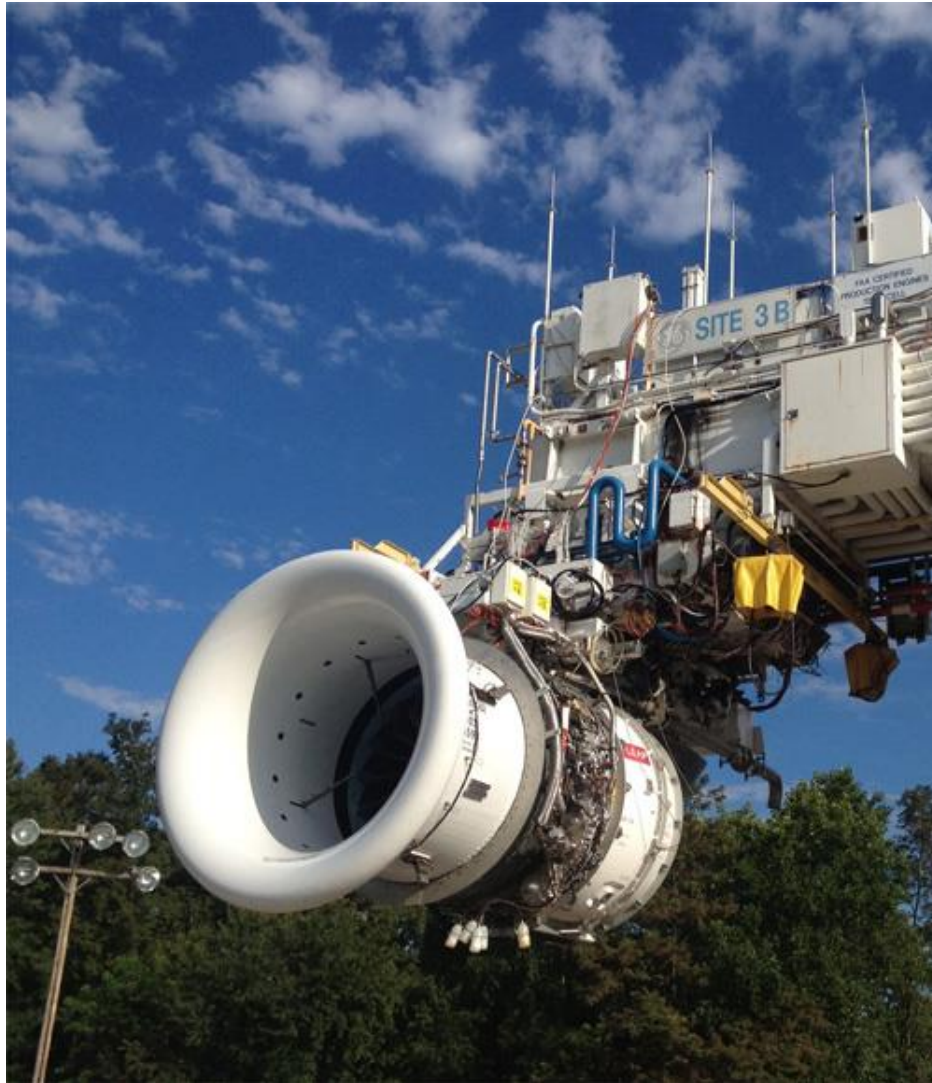
- Temperatura: 2000 K
- Rotação: 10 000 rpm
- Velocidade do escoamento: 1000 km/h
- Monocristal (sem fissura)
- Arrefecimento interno com ar do compressor (crítico)



* Ensaio

- Velocidade: 1 000 km/h
- Altitude: 11 km
- Densidade: $\frac{1}{4}$ do nível do mar
- Colisão com pássaro de 2 kg
- Manter impulso 30 minutos
- Consumo de combustível-precisão 1%

FIGURA 6 – Banco de ensaios



9 – ENSAIOS ESTRUTURAIS

- * Exemplar completo no solo-pode simular-se peso motor, mas estrutura tem que ser real
- * Ensaio até á destruição: carga $\geq 150 \%$
- * Ensaio de fadiga: ≥ 3 vezes o número de ciclos de voo do avião em serviço com maior uso;
- * Utilização de um avião comercial 3000 h de voo/ano (~9h por dia)
- * ≥ 2 voos por dia, 700/ano
- * Um avião pode voar 30 anos 90000h, 20000 voos

FIGURA 7 – Ensaio estrutural



10 – SISTEMAS DE BORDO

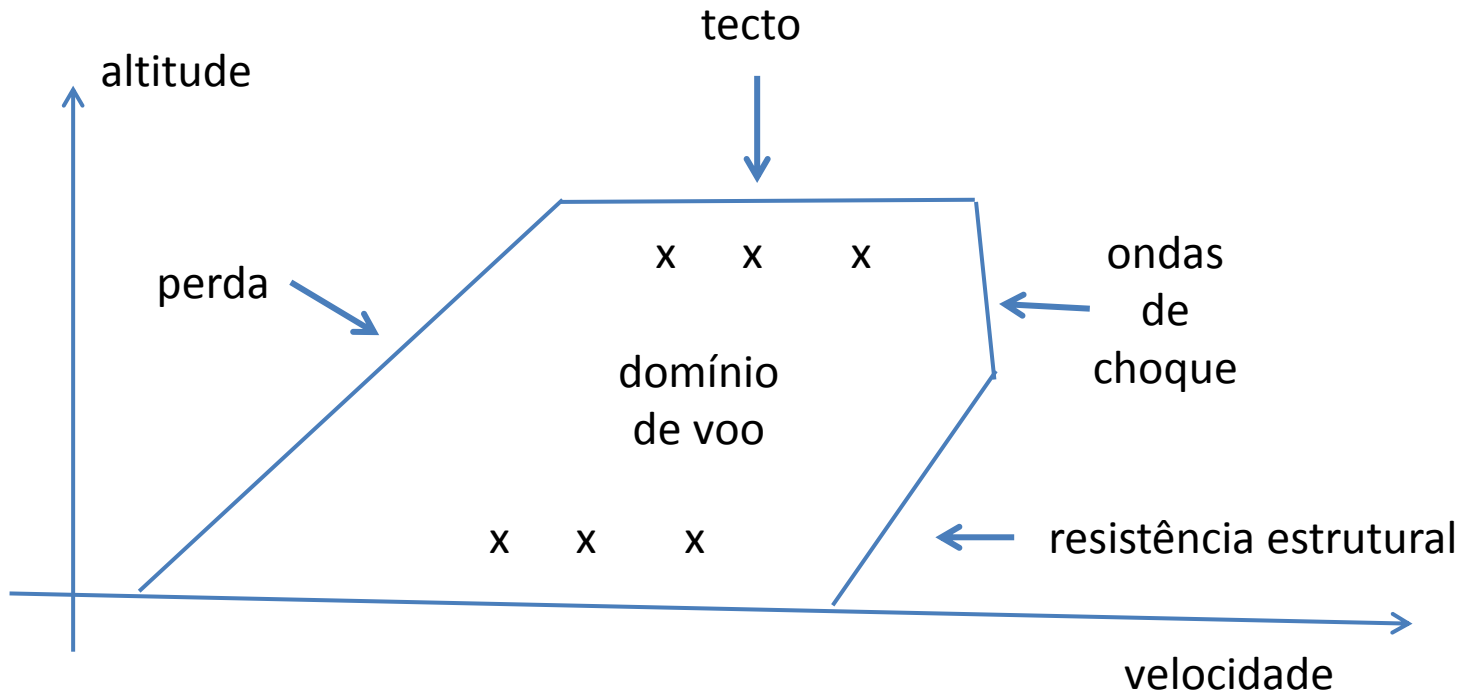
- * Eléctrico: 2 MW no Boeing B787
1.5 MW no Airbus A350
- * Trem de aterragem
 - ≥ 10 rodas
 - Peso do avião: 200 t
 - Velocidade de aterragem: 210 km/h
 - Trava em 3 000m;
 - Energia dissipada: 4×10^5 J = 400 MJ
 - travões de carbono multidisco
 - ABS desde 1960
- * Software: 2 milhões de linhas de código a verificar
- * Combustível: oscilações nos tanques, inflamabilidade evaporação
- * Emergência, redundância

FIGURA 8 – Sistema de combustível: ‘sloshing’ ou oscilações nos tanques

POSITION OF AIRCRAFT FUEL TANKS



11 – ENSAIOS EM VOO



* Verificar

- Milhares de parâmetros
- Dezenas de pontos no domínio de voo
- Situações normais, falhas e emergências
- Medições a bordo e no solo
- Ensaaios do construtor + certificação 3000 horas de voo, 2-3 anos
- Dispendioso, mais se há correcções a fazer (voltar ao projecto ?)

12 – AUSÊNCIA DE ACIDENTES

- * No passado testar um avião novo era uma aventura quase imprevisível.
- * Actualmente: todo o desenvolvimento de um avião sem faz sem um único acidente: como?
- * Ensaios e simulações no solo estabelecem modelo matemático do avião;
- * Simulação: modelo matemático do avião corre em tempo real em paralelo com os ensaios em voo;
- * Medições: em voo transmitidas em tempo real por telemetria para o solo;
- * Comparação em tempo real: concordância passa-se ao ponto de ensaio seguinte;
- * discordância: para-se ensaio, descobre-se a razão antes de correr risco de acidente.
- * Conclusão: mede-se, transmite-se, simula-se e compara-se milhares de parâmetros a alta frequência em tempo real.

13 – FIABILIDADE E SEGURANÇA

* Taxa de acidentes fatais: ≤ 1 por 100 milhões de km de voo (sempre a melhorar)

* Exemplo

- Dar a volta á terra (40 000 km) todas a semanas;
- Acidente ao fim de 2 500 semanas, ou 50 anos!

* Medidas de segurança:

- Projecto, ensaios no solo e em voo;
- Controlo dos materiais, processos de fabrico;
- Monitorização dos sistemas e manutenção;
- Qualificação de engenheiros, pilotos, controladores de tráfego aéreo, etc...
- Certificação de todas as fases do processo

14 – OPERAÇÃO E MANUTENÇÃO

- * Exemplo: motor
 - Custo de compra: 2 - 10 M€
 - Custo de manutenção ao longo da vida operacional: 2 a 4 maior;
- * Tolerâncias: pás de turbina
 - Excesso de temperatura: 30 K em 2000 K – metade da duração
 - Excesso de 60 K – catastrófico
- * Uso generalizado de HUMS (Health and Usage Monitoring Systems)
 - Manutenção preventiva
- * Outras tendências:
 - Testes não destrutivos;
 - Recuperação de componentes dispendiosos (pa's de turbina)
- Novos desafios, novos materiais
 - Delaminação de compósitos
 - Reparação de compósitos
- * Minimização dos tempos no solo por períodos prolongados: perda de receita.

15 – EVOLUÇÃO: VERSÕES MELHORADAS E NOVA GERAÇÃO

- * Potencial de desenvolvimento: o Douglas DC-8 passou de 119 passageiros no DC-8-10 a 262 no DC-8-63;
- * O motor Bristol Siddeley Olympus passou de 5 t de impulso no Avro Vulcan B. Mk. 1 até 15 t no Concorde;
- * Os melhoramentos incrementais são uma forma rentável de melhorar desempenho até certos limites;
- * Para além desses limites é necessário desenvolver uma nova geração:
 - Custo de desenvolvimento: 10 B€
 - Valor das vendas: $1000 \times 200 \text{ M€} = 200 \text{ B€}$
 - Período de desenvolvimento: 5 anos
 - Vida operacional: 20-50 anos;
- * Substituição amortizada por redução de 12% nos custos de operação
 - Motor mais eficiente

- Aerodinâmica melhor
- Estrutura mais leve
- Voo otimizado
- Menos manutenção
- Tolerâncias menores

Conclusão: Grande variedade de medições em todas as fases do ciclo de vida de um avião