

UNIVERSIDADE
BEIRA INTERIOR

Peso e Centragem

Projeto de Aeronaves (15096)

Licenciatura em Engenharia Aeronáutica

2024

Pedro V. Gamboa

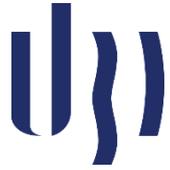
Departamento de Ciências Aeroespaciais

Faculdade de Engenharia



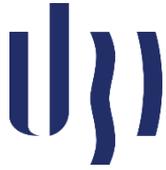
1. Introdução

- A determinação do peso (ou da massa) da aeronave e o posicionamento correto do centro de gravidade são de extrema importância para a viabilidade do projeto
- As atividades de peso e centragem devem acompanhar de perto o desenrolar do projeto para que as soluções adotadas mantenham o peso dentro dos limites desejados
- Por outro lado a posição e o passeio do CG devem ser tais que a aeronave seja estável e controlável no seu envelope de voo



1. Introdução

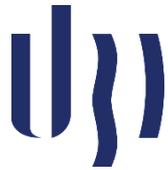
- No projeto conceptual são usados métodos estatísticos para determinar os pesos dos vários componentes da aeronave
- À medida que a estrutura e os sistemas são definidos, os pesos podem ser calculados ou medidos com maior precisão



2. Grupos de peso/massa

Peso e Centragem

Grupo das Estruturas	Grupo dos Sistemas	Grupo da Carga Útil
- Asa	- Controlos de voo	- Tripulação
- Cauda	- APU	- Combustível
E.H./canard	- Instrumentos	usável
E.V.	- Hidráulicos	retido
ventral	- Pneumáticos	- Óleo
- Corpo (fuselagem)	- Elétricos	- Passageiros
- Trem de aterragem	- Aviónicos	- Carga/bagagem
principal	- Armamento	- Canhões
auxiliar	- Interiores	- Munições
paragem	- Ar condicionado	- Cabides
catapulta	- Anti-gelo	- Armas alijáveis
- Secção da nacela/motor	- Fotografia	- “Flares/chaff”
- Sistema de admissão de ar	- Manuseamento de carga	
Grupo da Propulsão		
- Motor instalado		
- Redutora e transmissão	<u><i>Peso Vazio Total</i></u>	<u><i>Peso de Descolagem</i></u>
- Sistema de escape		- Peso em voo
- Sistema de arrefecimento		- Peso de aterragem
- Controlos do motor		
- Sistema de arranque		
- Sist. de comb./tanques		



3. Estimativa da massa

- Método aproximado:

Item	Fighters		Transports and bombers		General aviation		Multiplier	Approximate location
	lb/ft ²	{kg/m ² }	lb/ft ²	{kg/m ² }	lb/ft ²	{kg/m ² }		
Wing	9.0	{44}	10.0	{49}	2.5	{12}	$S_{\text{exposed planform}}$	40% MAC
Horizontal tail	4.0	{20}	5.5	{27}	2.0	{10}	$S_{\text{exposed planform}}$	40% MAC
Vertical tail	5.3	{26}	5.5	{27}	2.0	{10}	$S_{\text{exposed planform}}$	40% MAC
Fuselage	4.8	{23}	5.0	{24}	1.4	{7}	$S_{\text{wetted area}}$	40–50% length
Landing gear ^a	0.033	—	0.043	—	0.057	—	TOGW	—
	Navy: 0.045	—						
Installed engine	1.3	—	1.3	—	1.4	—	Engine weight	—
“All-else empty”	0.17	—	0.17	—	0.10	—	TOGW	40–50% length

^a15% to nose gear; 85% to main gear.

Para outras categorias de aeronaves esta informação tem que ser derivada da tabela comparativa.



3. Estimativa da massa

Métodos

- Métodos estatísticos:
 - São usadas equações que têm em conta a geometria e dimensão dos componentes estruturais, os materiais, o fator de carga e a massa máxima da aeronave
 - Podem derivar-se modelos para partes da aeronave ou para a aeronave completa
 - Normalmente cada gabinete de projeto usa os seus próprios métodos, de acordo com a sua experiência
 - Também é comum usar várias referências para obter a massa dos vários componentes e usar a média no projeto

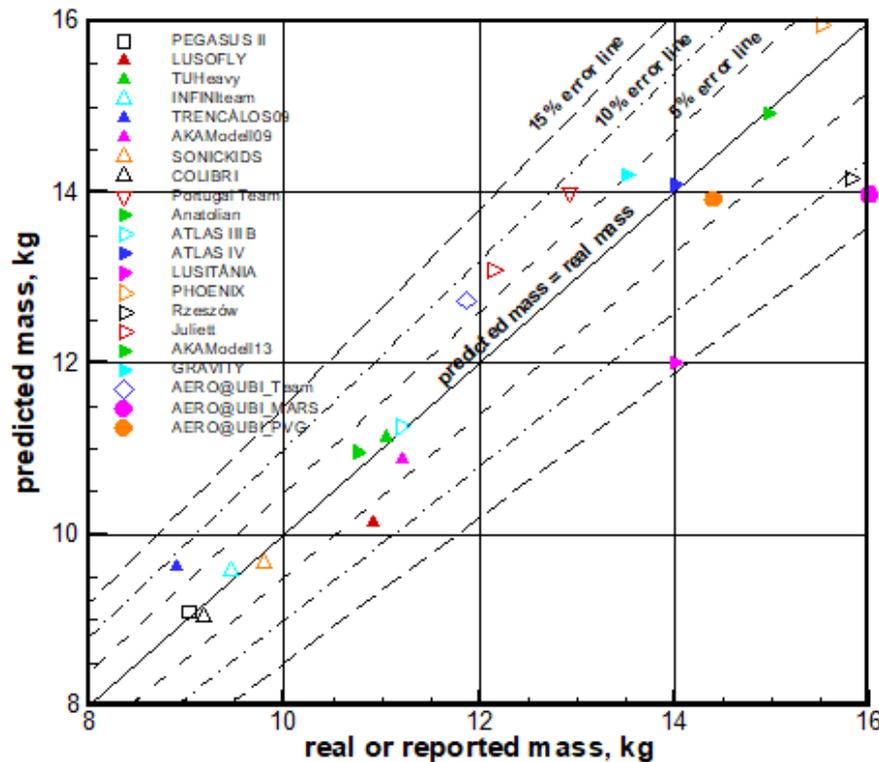
$$m = k \prod_{i=1}^{n_{par}} a_i^{c_i}$$



3. Estimativa da massa

Métodos

- Exemplo de método estatístico para o avião completo:
 - Competição Air Cargo Challenge (até 2019)



$$m = 3.2005b^{0.1986}c^{0.1234}m_{pay}^{0.5554}$$



3. Estimativa da massa

Métodos

- Métodos baseados em análise estrutural:
 - Com base no conceito estrutural podem derivar-se modelos estruturais que permitem o dimensionamento da estrutura e a estimativa da massa
 - Com base na configuração estrutural, nos materiais, nas tensões aplicadas e nas tensões admissíveis determina-se o peso da estrutura
 - Podem usar-se métodos de análise mais simples (baseados na mecânica dos sólidos) até métodos mais elaborados (baseados no método dos elementos finitos)
 - Estes modelos podem ser refinados/ajustados para efeitos e constrangimentos práticos de fabrico, usando aeronaves existentes

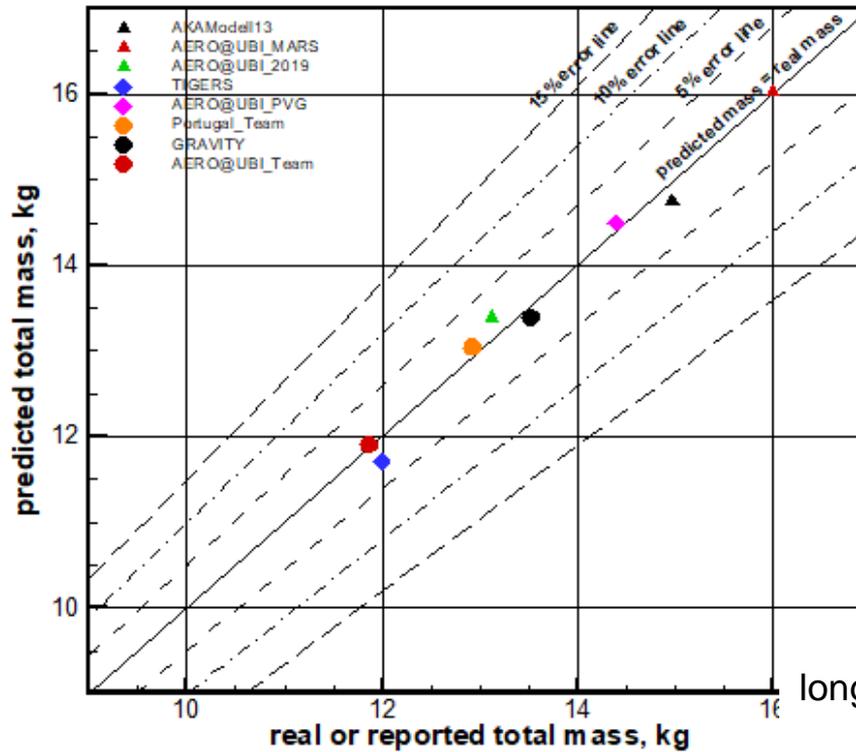
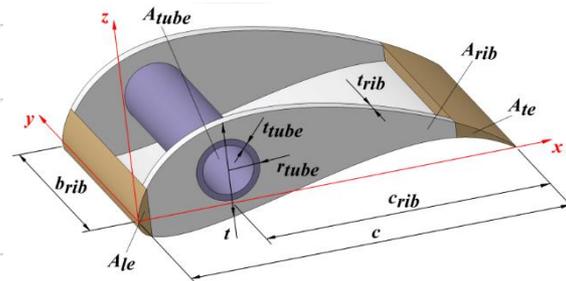
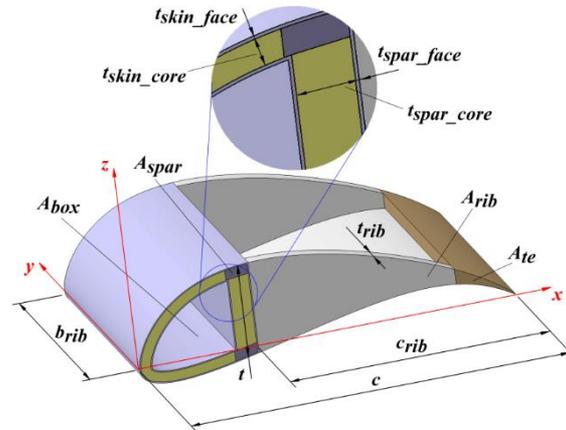
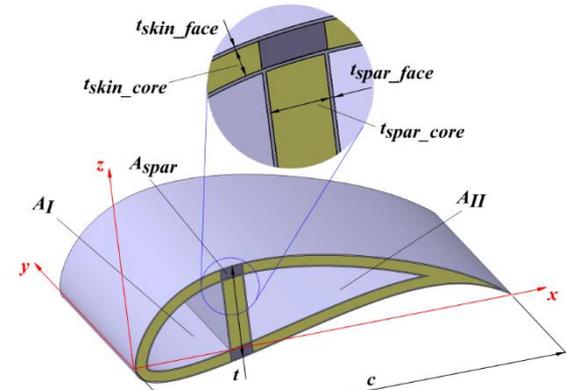


3. Estimativa da massa

Métodos

- Métodos baseados em análise estrutural:

casca e longarina



longarina tubular

Peso e Centragem



3. Estimativa da massa

Métodos

- Pesagem:
 - Com base numa aeronave existente com estrutura semelhante pode derivar-se uma representação da massa que depende dos parâmetros que definem o componente em questão
 - No projeto detalhado a estrutura e os sistemas são definidos até ao mais pequeno pormenor pelo que os volumes dos componentes e os materiais usados são conhecidos. As massas dos componentes podem ser obtidas dos desenhos de produção
 - No final, já com os componentes fabricados e o equipamento adquirido pode proceder-se à pesagem e obter a massa definitiva



3. Estimativa da massa

Métodos

- Métodos mistos:
 - Também é possível obter a massa dos vários components e sistemas usando uma combinação dos métodos anteriores
 - Por exemplo, pesagem de componentes de sistemas, que são normalmente comprados, e estimativa da massa de components estruturais



3. Estimativa da massa

Modelos de massa/peso simples

- Os principais dados necessários para este modelo são:
 - $W_{payload}$, peso da carga útil [N] (pode usar-se massa, m , em vez de peso)
 - W_{energy} , peso de combustível/baterias [N]
 - c_w , corda média da asa [m]
 - b_w , envergadura da asa [m]
 - $W_{empty,ref}$, peso vazio de referência [N]
 - $c_{w,ref}$, corda da asa de referência [m]
 - $b_{w,ref}$, envergadura da asa de referência [m]
- Exponentes de variação do peso:
 - k_b , expoente para a correção devido à envergadura da asa
 - k_c , expoente para a correção devido à corda da asa
 - k_i , expoente para a correção devido ao parâmetro i



3. Estimativa da massa

Modelos de massa/peso simples

- **Modelo 1:**
- A representação do peso em função da envergadura e da corda da asa é

$$W = W_{payload} + W_{energy} + W_{systems} + W_{empty,ref} \left(\frac{b_w}{b_{w,ref}} \right)^{k_b} \left(\frac{c_w}{c_{w,ref}} \right)^{k_c}$$

- Os expoentes são determinados experimentalmente ou com base em aeronaves semelhantes



3. Estimativa da massa

Modelos de massa/peso simples

- **Modelo 2:**
- Outra representação do peso em função da envergadura e da corda da asa pode ser:

$$W = W_{payload} + W_{energy} + W_{systems} + W_{empty,ref} + \Delta W_w + \Delta W_h + \Delta W_v$$

$$W = W_{payload} + W_{energy} + W_{systems} +$$

$$+ W_{empty,ref} + W_{w,ref} \left(\frac{W_w}{W_{w,ref}} - 1 \right) + W_{h,ref} \left(\frac{W_h}{W_{h,ref}} - 1 \right) + W_{v,ref} \left(\frac{W_v}{W_{v,ref}} - 1 \right)$$

- Este modelo assume que os coeficientes de volume de cauda se mantêm constantes após a mudança das dimensões da asa, ou seja a dimensão da cauda ajusta-se à dimensão da asa



3. Estimativa da massa

Modelos de massa/peso simples

- **Modelo 2:**
- Os incrementos do peso são dados por:
 - Incremento do peso da asa:

$$\Delta W_w = K_w W_{empty,ref} \left[\left(\frac{b_w}{b_{w,ref}} \right)^{1.358} \times \left(\frac{c_w}{c_{w,ref}} \right)^{0.158} \times \left(\frac{nW}{n_{ref}W_{ref}} \right)^{0.49} - 1 \right]$$

- Incremento do peso da empenagem horizontal:

$$\Delta W_h = K_h W_{empty,ref} \left[\left(\frac{b_w}{b_{w,ref}} \right)^{0.896} \times \left(\frac{c_w}{c_{w,ref}} \right)^{1.794} \times \left(\frac{nW}{n_{ref}W_{ref}} \right)^{0.414} - 1 \right]$$

- Incremento do peso da empenagem vertical:

$$\Delta W_v = K_v W_{empty,ref} \left[\left(\frac{b_w}{b_{w,ref}} \right)^{1.747} \times \left(\frac{c_w}{c_{w,ref}} \right)^{0.873} \times \left(\frac{nW}{n_{ref}W_{ref}} \right)^{0.376} - 1 \right]$$



3. Estimativa da massa

Modelos de massa/peso simples

- Modelo 2:
- onde:

$$K_w = \frac{W_{w,ref}}{W_{empty,ref}} \quad K_h = \frac{W_{h,ref}}{W_{empty,ref}} \quad K_v = \frac{W_{v,ref}}{W_{empty,ref}}$$

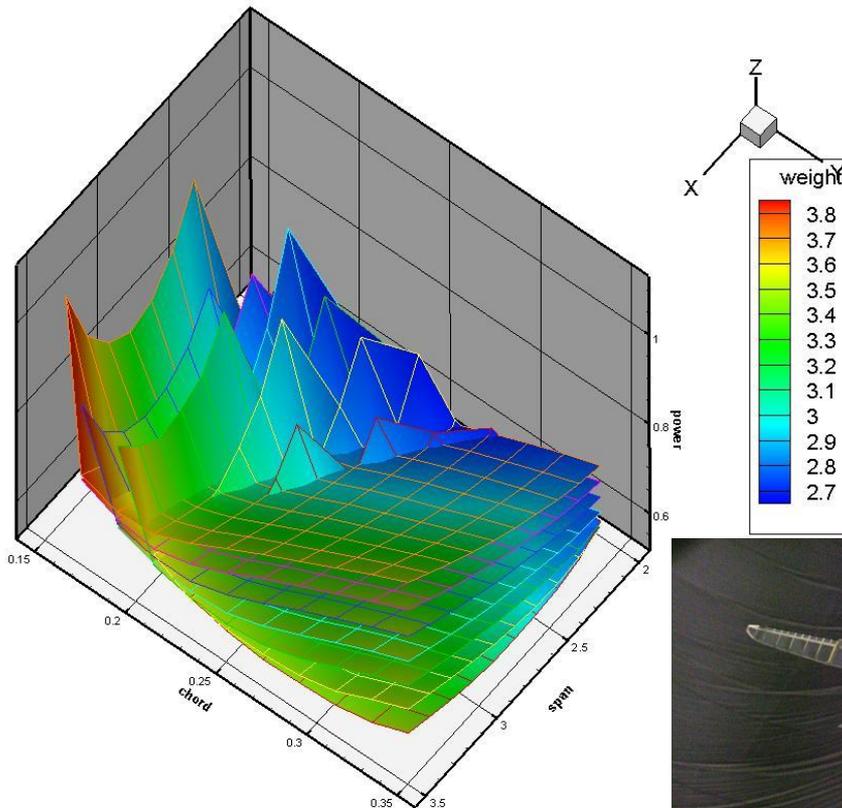
- Convém reparar que os incrementos dependem do peso final e, por isso, este método é iterativo
- Os valores de K_w , K_h e K_v são obtidos de aeronaves com características idênticas, com base em ensaios ou com alguma análise apropriada
- Os expoentes podem ser adaptados para o projeto em questão
- Podem adicionar-se mais termos para refinar a estimativa (fuselagem, afilamento, velocidade de projeto, etc.)



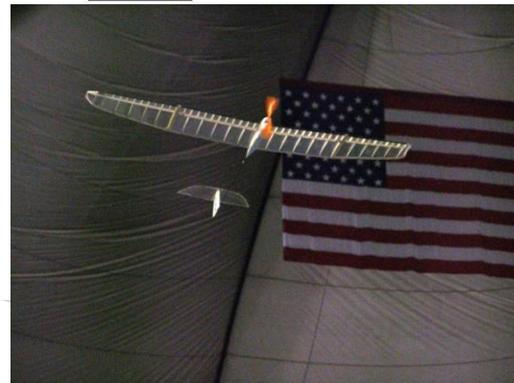
3. Estimativa da massa

Modelos de massa/peso simples

- Exemplo de um modelo com base no modelo 2 e na configuração estrutural:



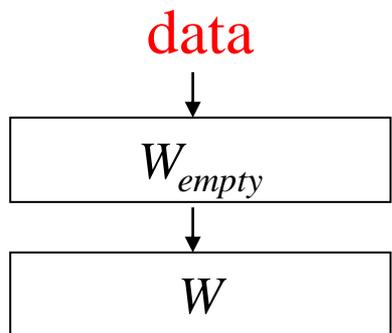
- Corda da asa de 0,25 m e envergadura de 2,5 m
- Massa em vazio de 200 g (massa total de 350 g)
- Autonomia de voo de 4 h
- Potência elétrica em torno de 1W a 3 W



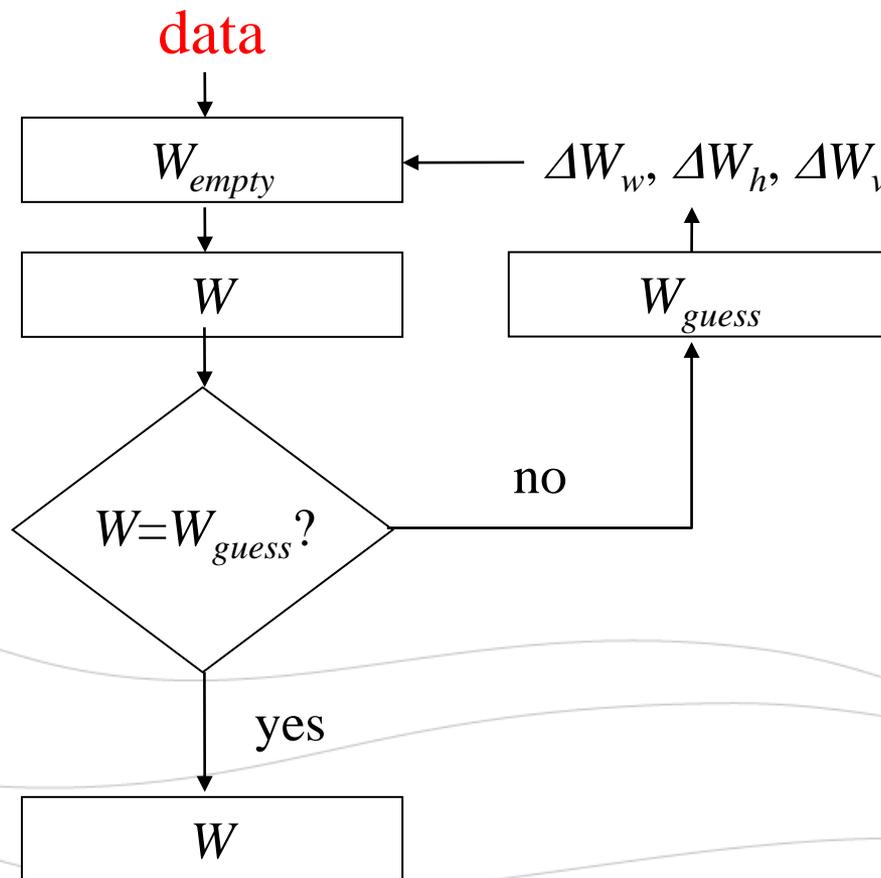


4. Exemplo de implementação

Modelo 1



Modelo 2





5. Tabela de peso e centragem

- O objetivo da tabela de peso e centragem é distribuir os componentes do avião para que o CG fique numa posição desejável
- Escolhem-se eixos de referência x e z

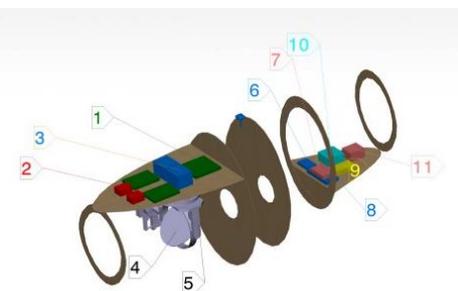
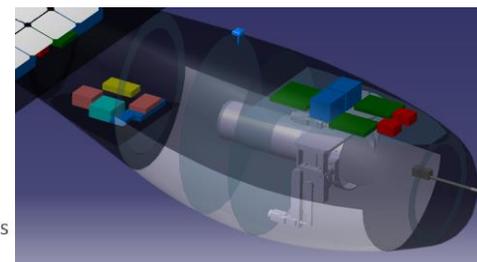
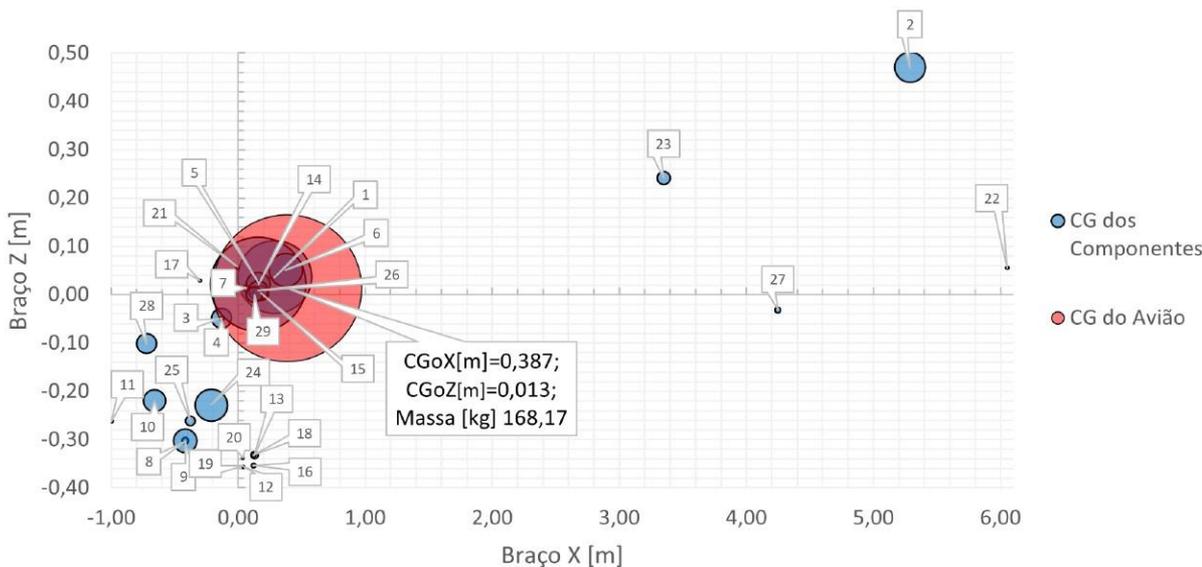
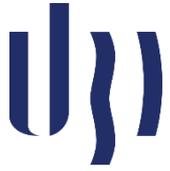


Figura 5: Posição do centro de gravidade. 1 - Asa, 2 - Empenagem, 3 - Motores, 4 - Hélices, 5 - Baterias, 6 - Células, 7 - ESC, 8 - Espelho, 9 - Câmera, 10 - Gimbal, 11 - Pitot Tube, 12 - GNSS, 13 - PC, 14 - MPPT, 15 - BMS, 16 - Data link, 17 - Antena data link, 18 - Autopilot, 19 - SATCOM, 20 - Transponder, 21 - Luzes da asa, 22 - Luzes da cauda, 23 - Servos, 24 - Fuselagem, 25 - Cavernas, 26 - switch, 27 - cone de cauda, 28 - Bateria dentro da fuselagem, 29 - cabos.

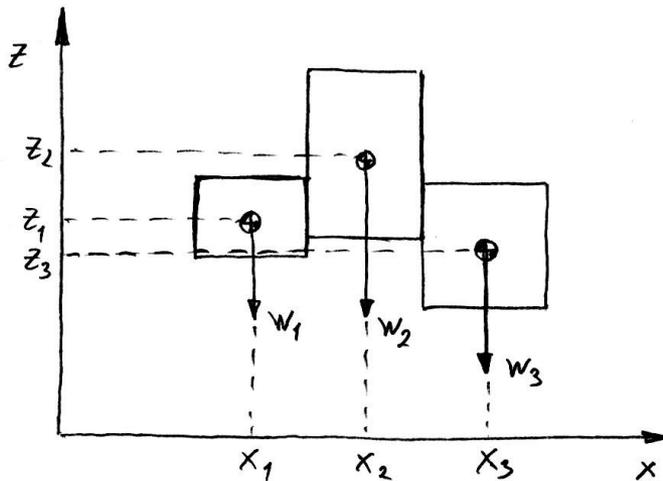


5. Tabela de peso e centragem

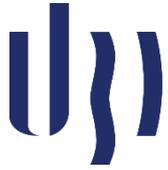
item	designação	peso	braço x	momento x	braço z	momento z
1	parte 1	W_1	x_1	W_1x_1	z_1	W_1z_1
2	parte 2	W_2	x_2	W_2x_2	z_2	W_2z_2
3	parte 3	W_3	x_3	W_3x_3	z_3	W_3z_3

ΣW_i $\Sigma W_i x_i$ $\Sigma W_i z_i$

Peso e Centragem



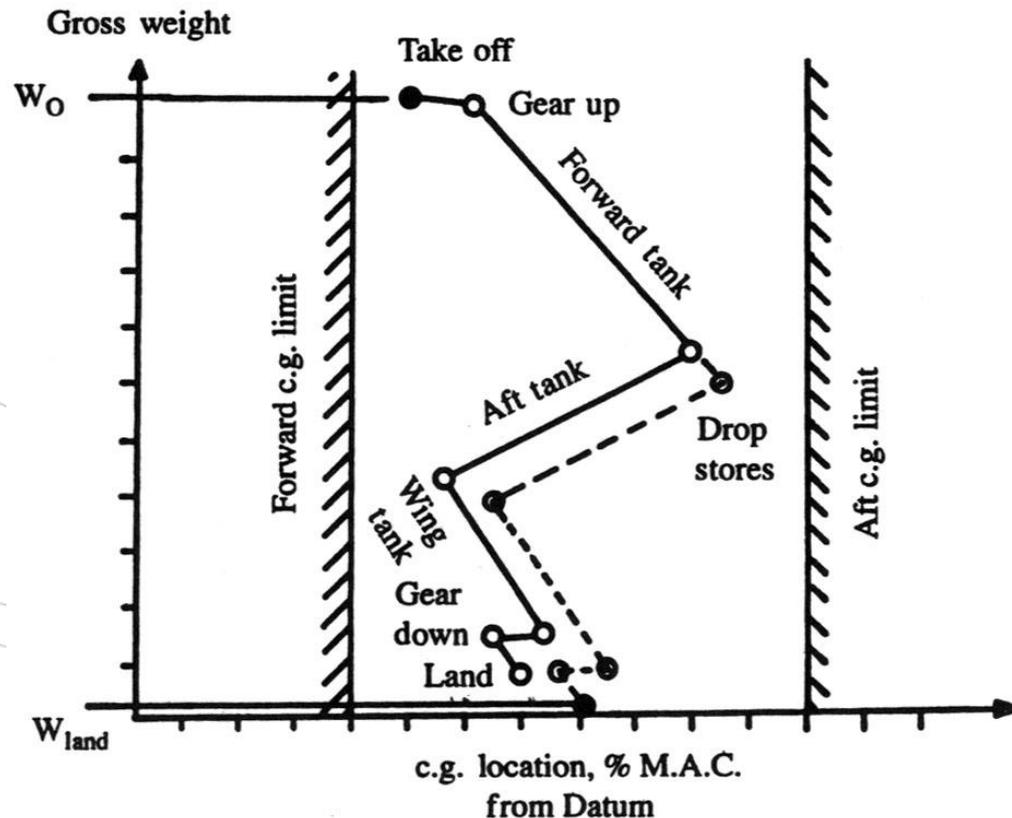
$$x_{CG} = \frac{\sum W_i x_i}{\sum W_i} \quad \text{e} \quad z_{CG} = \frac{\sum W_i z_i}{\sum W_i}$$



5. Tabela de peso e centragem

Passeio do CG

- Devem considerar-se diferentes valores dos components variáveis (combustível, carga útil, configuração dos flaps ou do trem, etc.) para determinar os limites do CG



Fonte: Raymer, 2004



6. Efeito na estabilidade

- Estabilidade e controlo longitudinal:

