

UNIVERSIDADE  
BEIRA INTERIOR

# Trem de Aterragem

Projeto de Aeronaves (15096)

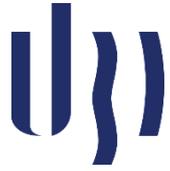
Licenciatura em Engenharia Aeronáutica

2024

Pedro V. Gamboa

Departamento de Ciências Aeroespaciais

Faculdade de Engenharia



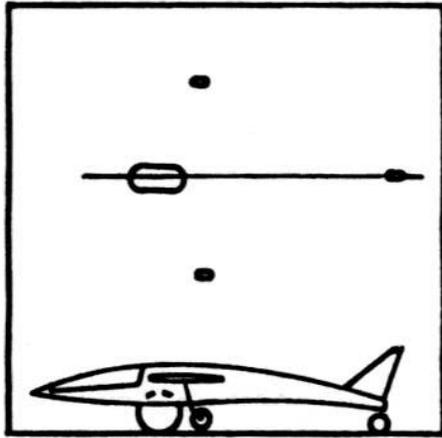
# 1. Introdução

- O trem de aterragem é um sistema de extrema importância, uma vez que permite a operação da aeronave no solo
- O trem tem que ser colocado numa posição adequada para que proporcione estabilidade e controlo no solo
- A integração do trem na aeronave tem que ser cuidada, especialmente quando aquele é retrátil

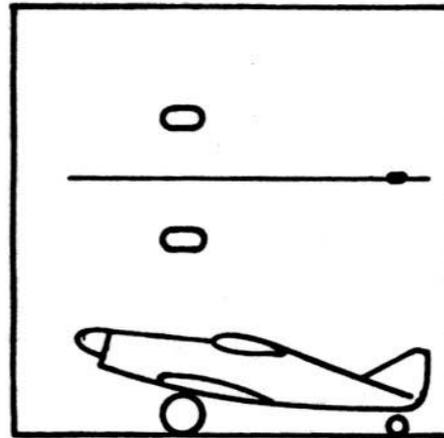


## 2. Configuração do trem de aterragem

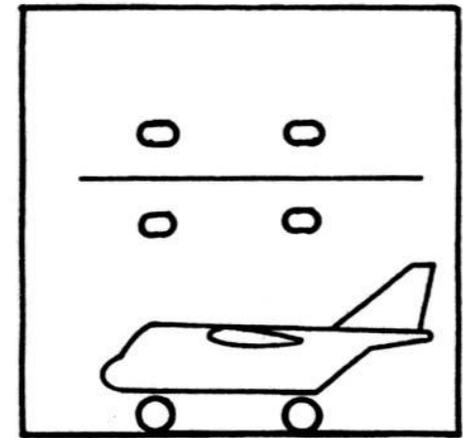
Trem de Aterragem



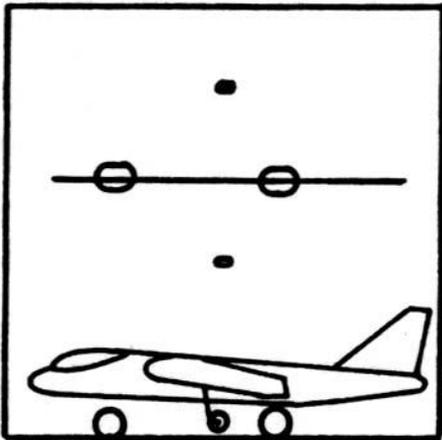
Single main



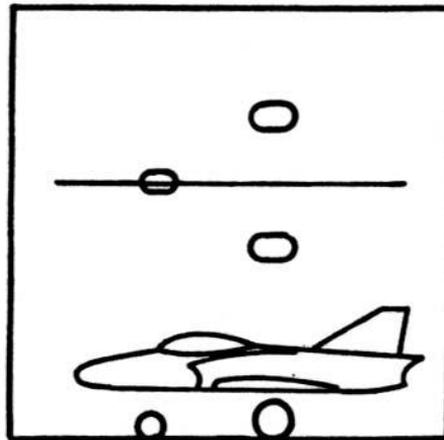
Taildragger



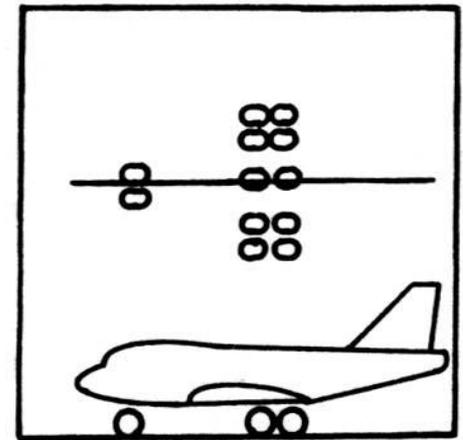
Quadricycle



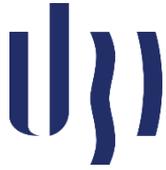
Bicycle



Tricycle



Multi-bogey

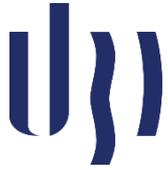


## 2. Configuração do trem de aterragem

# Trem de cauda

Vantagens	Desvantagens
<ul style="list-style-type: none"><li>Barato</li><li>Baixa resistência aerodinâmica</li><li>Fixação simples na asa ou fuselagem</li><li>Ângulo de ataque elevado na aterragem (grande resistência aerodinâmica)</li><li>Melhor para pistas não preparadas</li><li>Peso baixo da roda de bequilha</li><li>Mecanismo de direção simples</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>Controlo no solo difícil</li><li>Direcionalmente instável</li><li>Visão reduzida no solo</li><li>Controlo direcional difícil com vento cruzado</li><li>O hélice pode tocar no solo em travagens bruscas</li><li>Aceleração baixa na descolagem devido a ângulo de ataque elevado</li></ul>

Trem de Aterragem



## 2. Configuração do trem de aterragem

# Trem triciclo

Trem de Aterragem

Vantagens	Desvantagens
<p>Direcionalmente estável</p> <p>Boa visibilidade no solo</p> <p>Bom controlo com vento cruzado</p> <p>Hélice não toca no solo (o nariz não baixa muito na travagem)</p> <p>Boa aceleração na descolagem (baixo ângulo de ataque)</p> <p>Distância entre eixos pequena permite raio de viragem pequeno</p>	<p>Perna dianteira pesada devido a cargas dinâmicas elevadas</p> <p>Resistência aerodinâmica elevada com trem fixo (esteira do hélice)</p> <p>Mecanismo de direção mais complexo</p> <p>Mais caro</p> <p>Retração da roda do nariz mais complexa devido ao espaço</p> <p>Travagem brusca alivia a carga nas rodas principais podendo provocar derrapagem</p>



## 2. Configuração do trem de aterragem

# Trem mono-roda

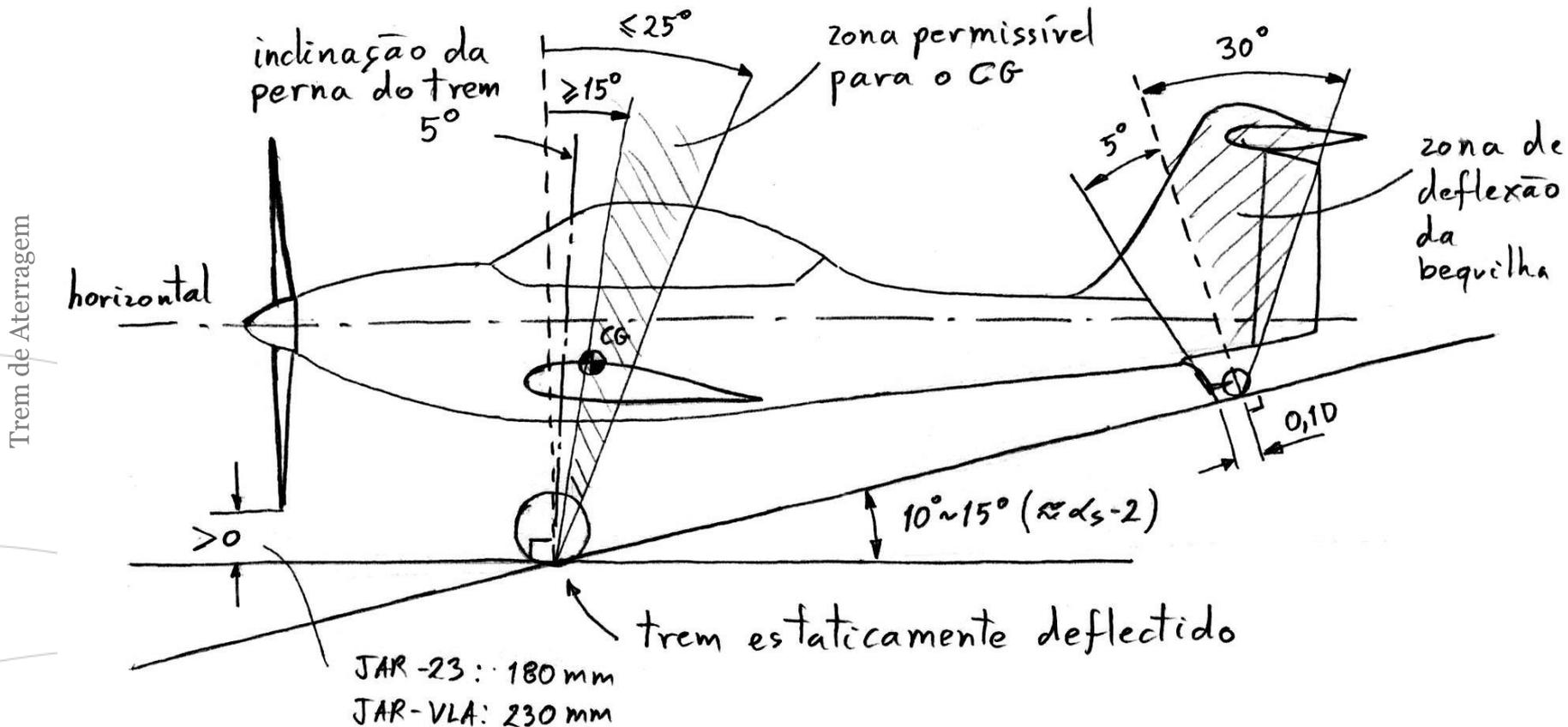
Vantagens	Desvantagens
<p>Eliminação de rodas e pernas das asas Médio a baixo peso Barato e simples Resistência aerodinâmica baixa Cargas transmitidas diretamente para a fuselagem</p>	<p>Necessidade de rodas nas pontas das asas Controlo no solo difícil especialmente com vento cruzado Redução da distância da hélice ao solo Espaço reduzido para retrair a roda “Taxiways” mais largos Velocidade de descolagem mais elevada devido a dificuldade de rotação</p>

Trem de Aterragem



## 2. Configuração do trem de aterragem

# Geometria do trem de cauda

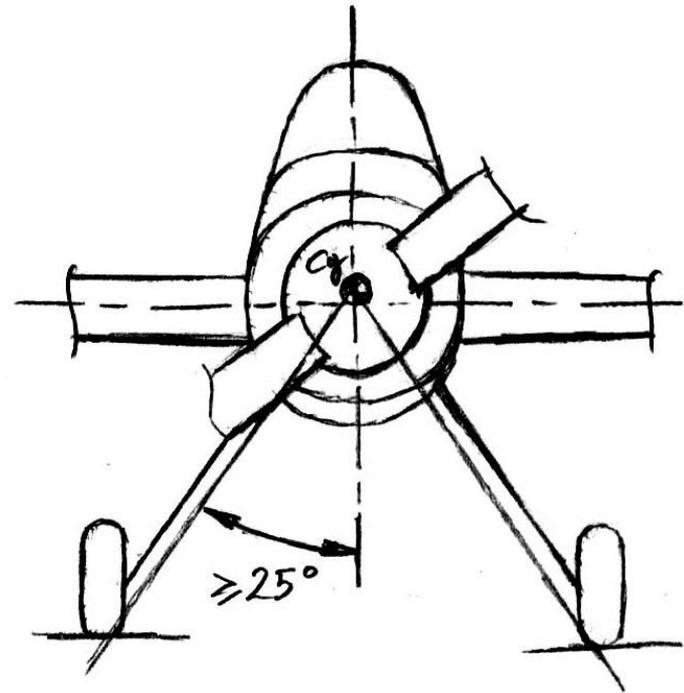
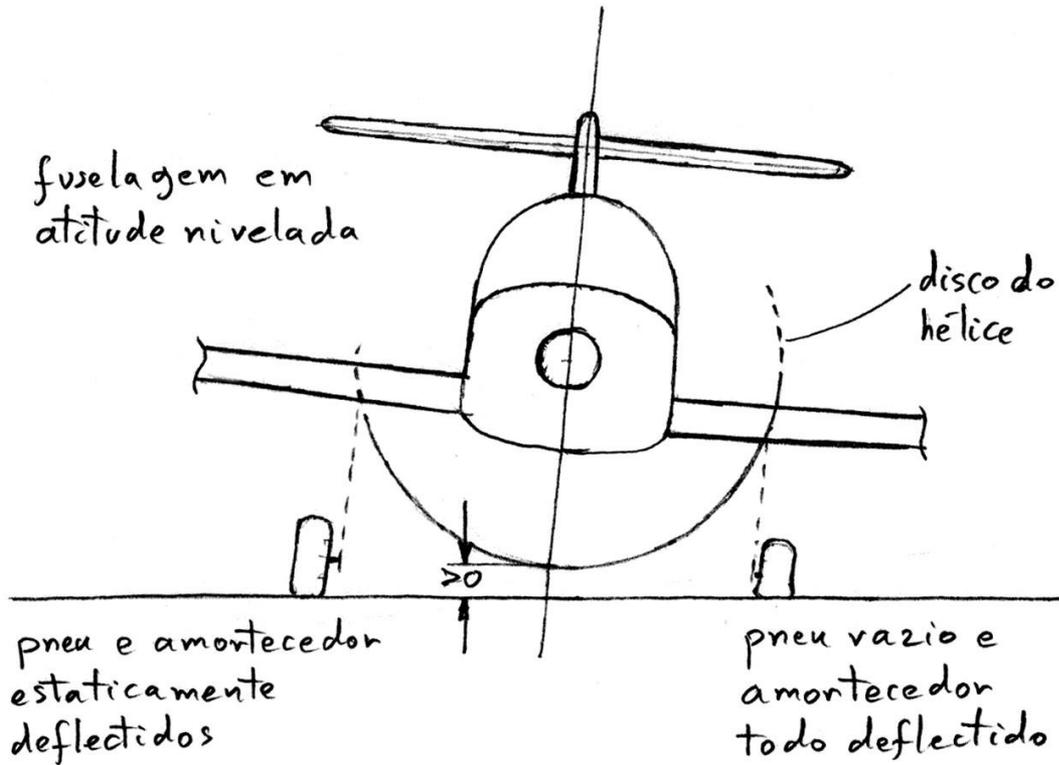




## 2. Configuração do trem de aterragem

# Geometria do trem de cauda

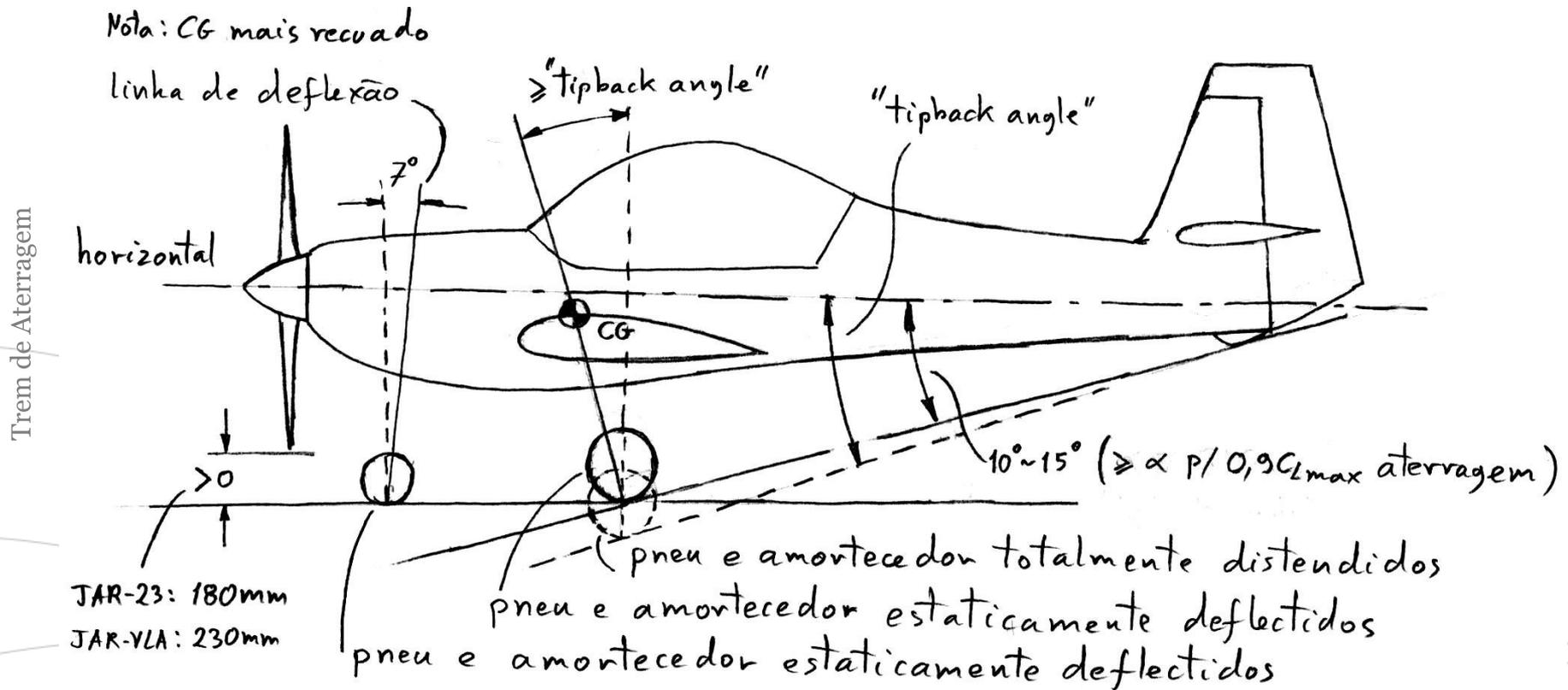
Trem de Aterragem





## 2. Configuração do trem de aterragem

# Geometria do trem triciclo

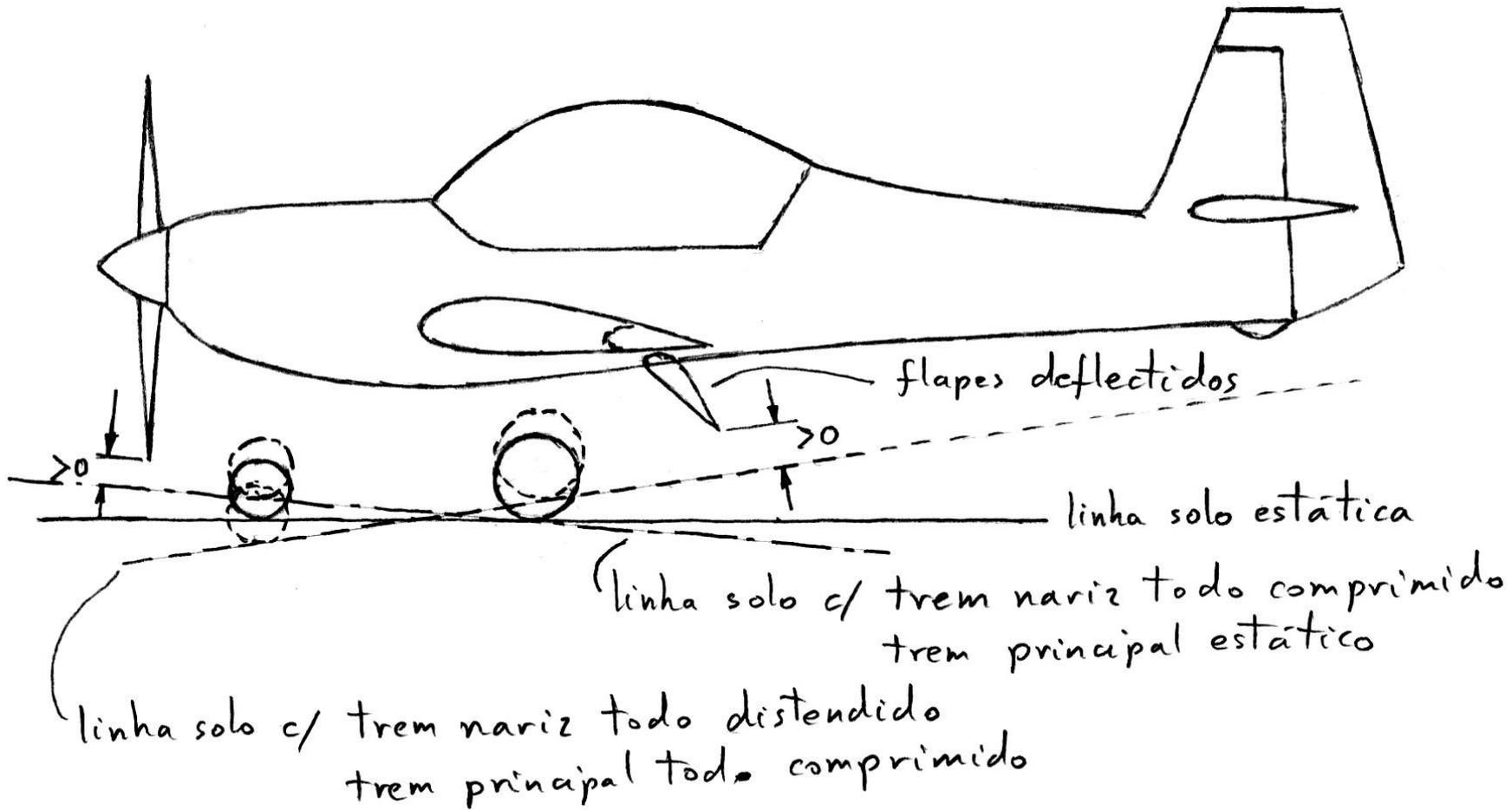




## 2. Configuração do trem de aterragem

# Geometria do trem triciclo

Trem de Aterragem



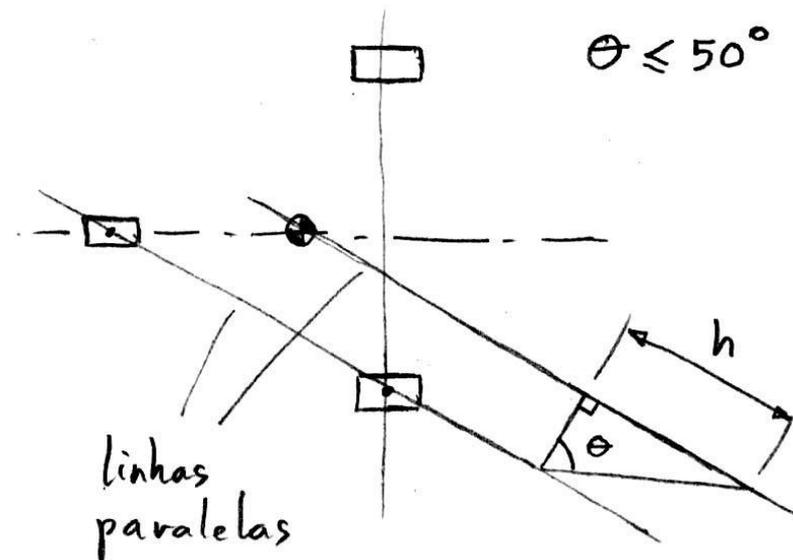
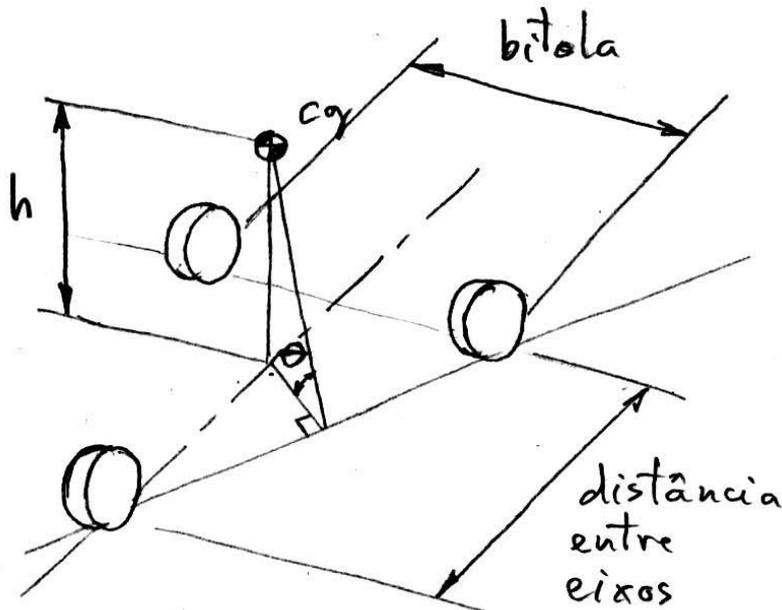


## 2. Configuração do trem de aterragem

# Geometria do trem triciclo

- “Overturn angle”  $< 63^\circ$  - pistas lisas e duras
- “Overturn angle”  $< 55^\circ$  - aviação geral
- “Overturn angle”  $< 50^\circ$  - pistas não preparadas
- O CG mais avançado é o mais crítico

Trem de Aterragem





# 3. Cargas no trem de aterragem

- Do equilíbrio de forças e momentos tem-se:

- $R_M = 0,5n_g W \left\{ \frac{(b - \mu_N h)}{[a + b + (\mu_M - \mu_N)h]} \right\}$

- $R_N = n_g W \left\{ \frac{(a + \mu_M h)}{[a + b + (\mu_M - \mu_N)h]} \right\}$

- $R_M$  – carga numa perna/roda principal

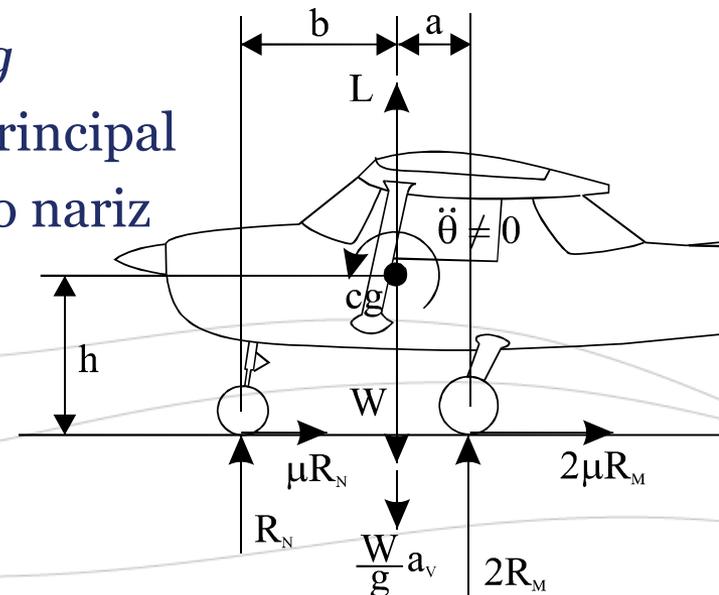
- $R_N$  – carga na perna/roda do nariz

- $W$  – peso da aeronave

- $n_g$  – fator de carga no solo =  $(a_v + g)/g$

- $\mu_M$  – coeficiente de fricção na roda principal

- $\mu_N$  – coeficiente de fricção na roda do nariz





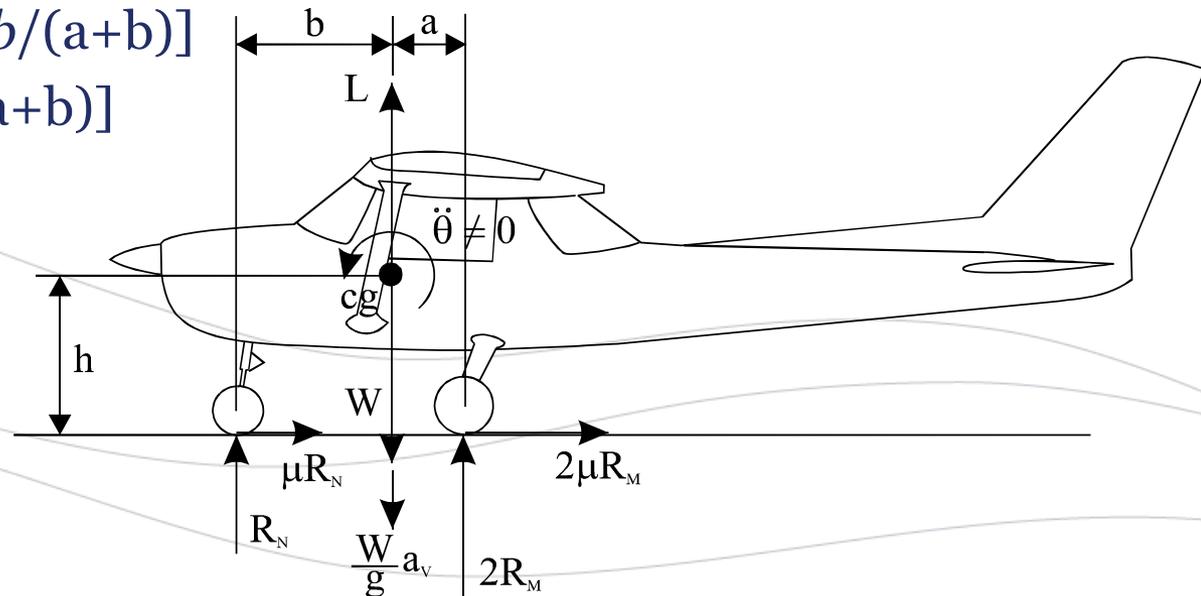
### 3. Cargas no trem de aterragem

# Cargas estáticas

- $R_M$  – carga estática numa roda principal. O CG mais recuado é o mais crítico
- $R_N$  – carga estática na roda do nariz. O CG mais adiantado é o mais crítico. Esta carga é 8% a 15% da carga total  $W$
- $n_g = 1$ ;  $\mu_M = \mu_N = 0$
- Do equilíbrio de forças e momentos tem-se

–  $R_M = 0,5W[b/(a+b)]$

–  $R_N = W[a/(a+b)]$





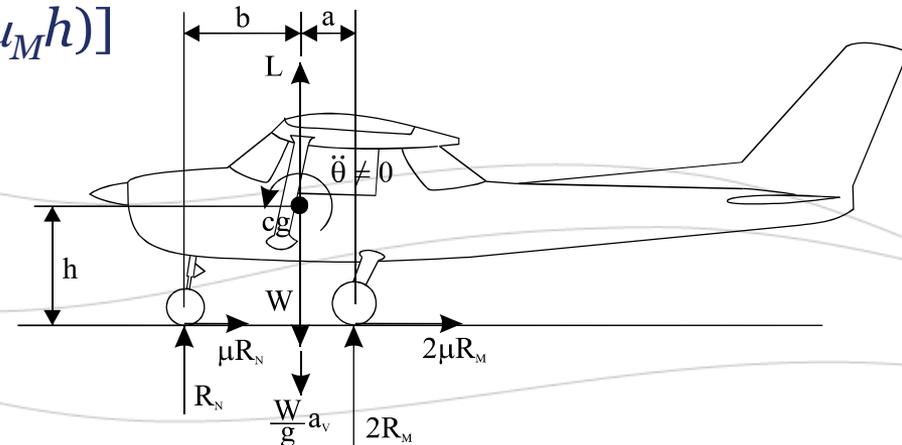
### 3. Cargas no trem de aterragem

# Cargas de travagem

- Assume-se que existem travões apenas nas rodas principais (coeficiente de fricção  $\mu_M = 0,3$  a  $0,4$ ;  $\mu_N = 0$ )
- $n_g = 1$
- $R_M$  – carga de travagem numa roda principal
- $R_N$  – carga de travagem na perna do nariz (o CG mais adiantado é o mais crítico)
- Do equilíbrio de forças e momentos tem-se:

- $R_M = 0,5W[b/(a+b+\mu_M h)]$

- $R_N = W[(a+\mu_M h)/(a+b+\mu_M h)]$





### 3. Cargas no trem de aterragem

# Cargas de aterragem

- Fator de carga no solo:

Tipo de avião	$n_g$
Bombardeiro grande	2,0-3,0
Comercial	2,7-3,0
Aviação geral	3,0
Caça da força aérea	3,0-4,0
Caça da marinha	5,0-6,0

Trem de Aterragem

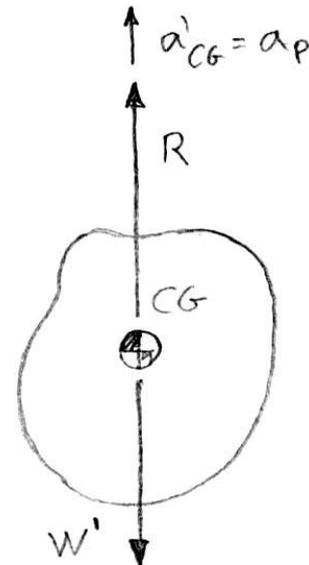
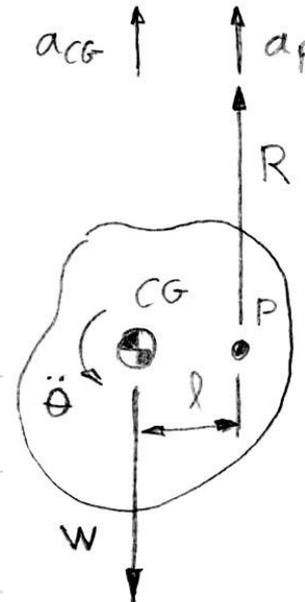


### 3. Cargas no trem de aterragem

# Cargas de aterragem

- Peso equivalente:
  - $a_{CG} = R/(W/g)$
  - $a_P = a_{CG} + l\ddot{\theta} = a_{CG} + Rl^2/I = R/(W/g) + Rl^2/[(W/g)k^2] = (1+l^2/k^2)R/(W/g)$
  - Qual é a massa  $W'/g$  que sofre a aceleração  $a_P$  sob a força  $R$  aplicada no seu CG ( $a'_{CG} = a_P$ )?
  - $R/(W'/g) = (1+l^2/k^2)R/(W/g)$
  - $W' = W/(1+l^2/k^2)$

Trem de Aterragem



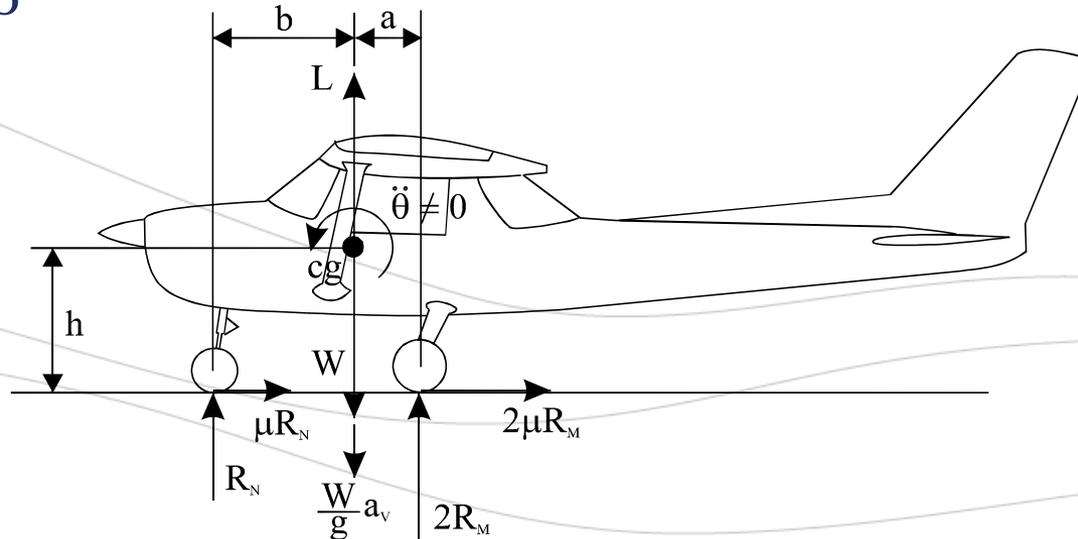


### 3. Cargas no trem de aterragem

# Cargas de aterragem

- Aterragem nivelada (todas as rodas tocam no solo ao mesmo tempo):
  - $W' = W$  ;  $\mu_M = \mu_N = \mu$
  - $R_M = 0,5n_g W[(b-\mu h)/(a+b)]$
  - $R_N = n_g W[(a+\mu h)/(a+b)]$
  - O coeficiente de fricção no impacto pode tomar o valor de 0,25

Trem de Aterragem



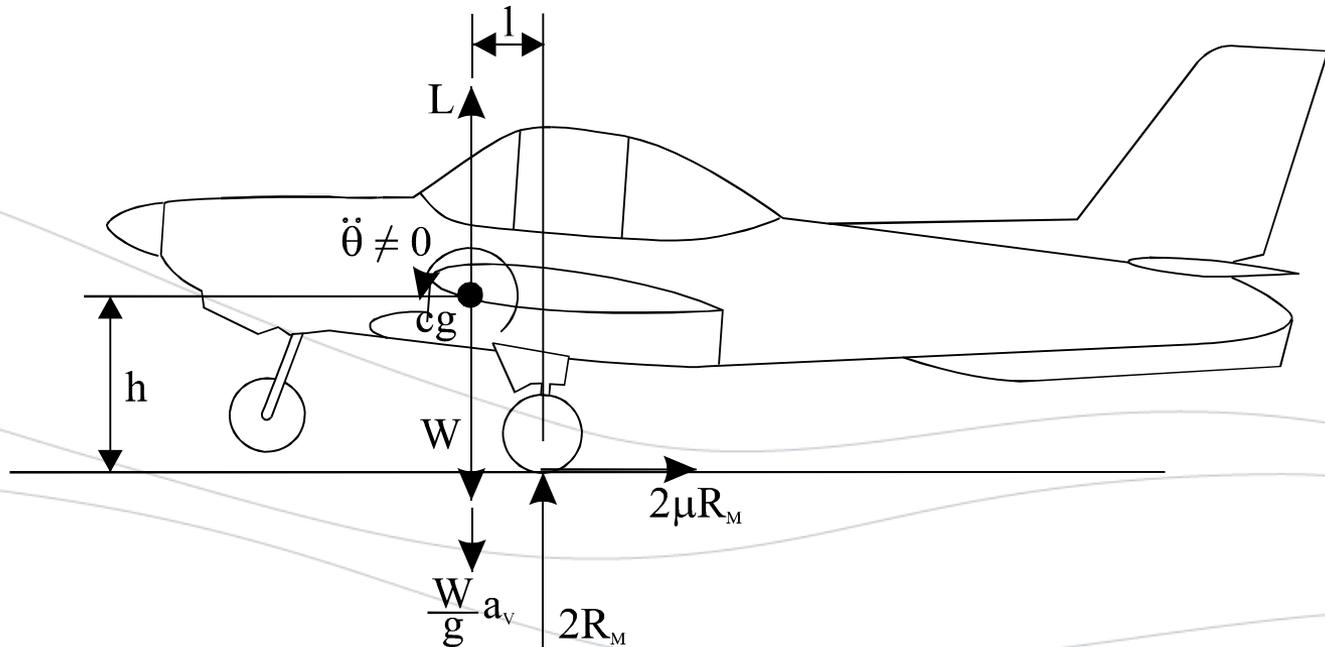


### 3. Cargas no trem de aterragem

# Cargas de aterragem

- Aterragem nas rodas principais:
  - $W' = W/(1+l^2/k_y^2)$
  - $R_M = 0,5n_g W'$
  - $R_N = 0$

Trem de Aterragem



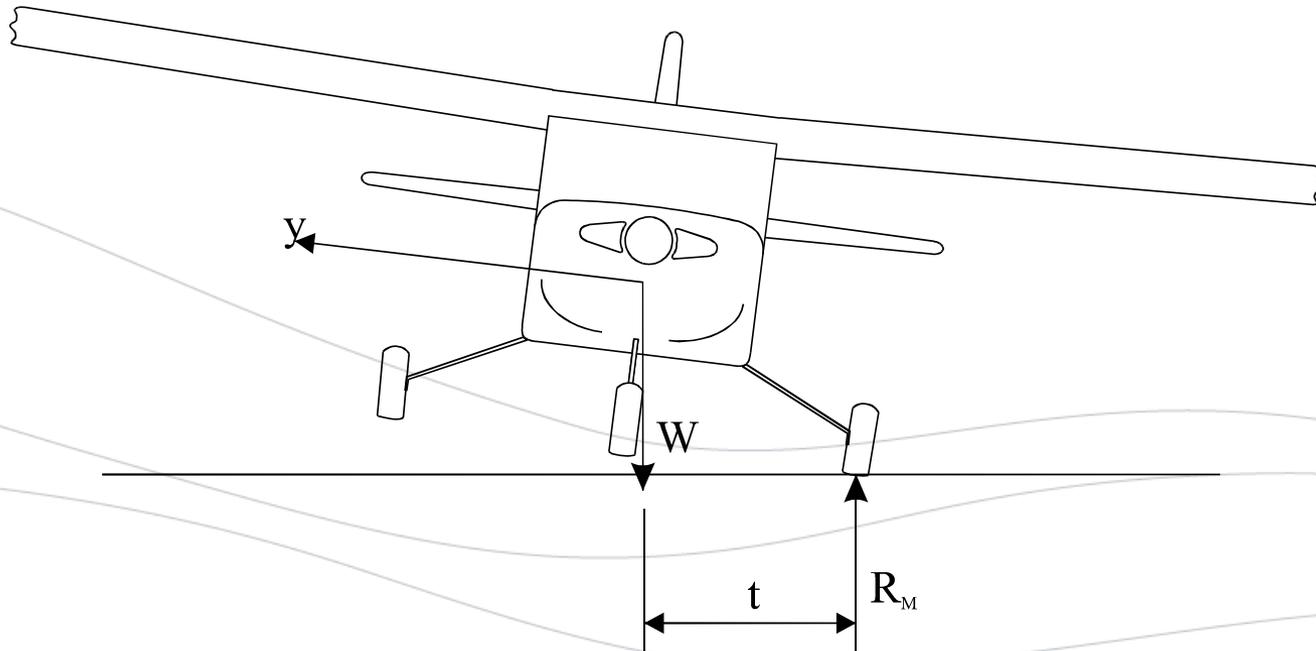


### 3. Cargas no trem de aterragem

# Cargas de aterragem

- Aterragem numa perna principal:
  - $W' = W / (1 + l^2/k_y^2 + t^2/k_x^2)$
  - $R_M = n_g W'$
  - $R_N = 0$

Trem de Aterragem





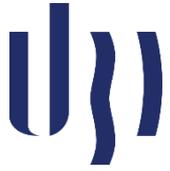
## 4. Dimensionamento do pneu

- Dimensionamento estatístico:

$$\text{Diâmetro ou largura das rodas principais} = A \cdot W_w^B$$

	Diâmetro		Largura	
	A	B	A	B
Aviação geral	5,1	0,349	2,3	0,312
Bimotor executivo	8,3	0,251	3,5	0,216
Transporte/bombardeiro	5,3	0,315	3,9	0,480
Jato de caça/treino	5,1	0,302	3,6	0,467

$W_w$  em kgf e diâmetro e largura em cm.



## 4. Dimensionamento do pneu

- Dimensionamento baseado nas cargas:
  - Carga nominal do pneu  $>$  carga estática máxima
  - Carga nominal do pneu  $>$  carga de travagem máxima/1,5
  - Carga nominal do pneu  $>$  carga de aterragem máxima/2,7
  - Velocidade nominal do pneu  $>$  velocidade máxima na pista



## 4. Dimensionamento do pneu

- Pneus de baixa pressão (tipo III):

Dimensão	Diâmetro externo [mm] D <sub>P</sub>	Largura [mm] b <sub>P</sub>	Carga nominal [kgf]	Velocidad e nominal [km/h]	Diâmtro carregado [mm]	Peso [kgf]	Pressão nominal [psi]
3.00-3.5	216	76	186	-	91	0,8	50
4.00-3.5	273	102	322	257	113	1,4	40
4.00-4.0	279	102	427	257	121	1,8	70
5.00-4.5	330	127	-	257	99	3,4	78
5.00-5.0	356	127	363-1407	193-257	145	2,2-3,2	31-130
5.50-4.0	337	140	556	257	147	3,6	50
6.00-4.0	394	152	658	257	169	3,4	35
6.00-6.0	432	152	522-1067	193-257	175	3,5-4,0	29-55
6.00-6.5	438	152	795	257	178	3,8	45



## 4. Dimensionamento do pneu

- Pressão dos pneus:
  - A pressão dos pneus tem que ser inferior à pressão admissível pela pista
  - Caso seja necessário reduzir a pressão exercida no piso pode usar-se mais do que uma roda na perna do trem em questão

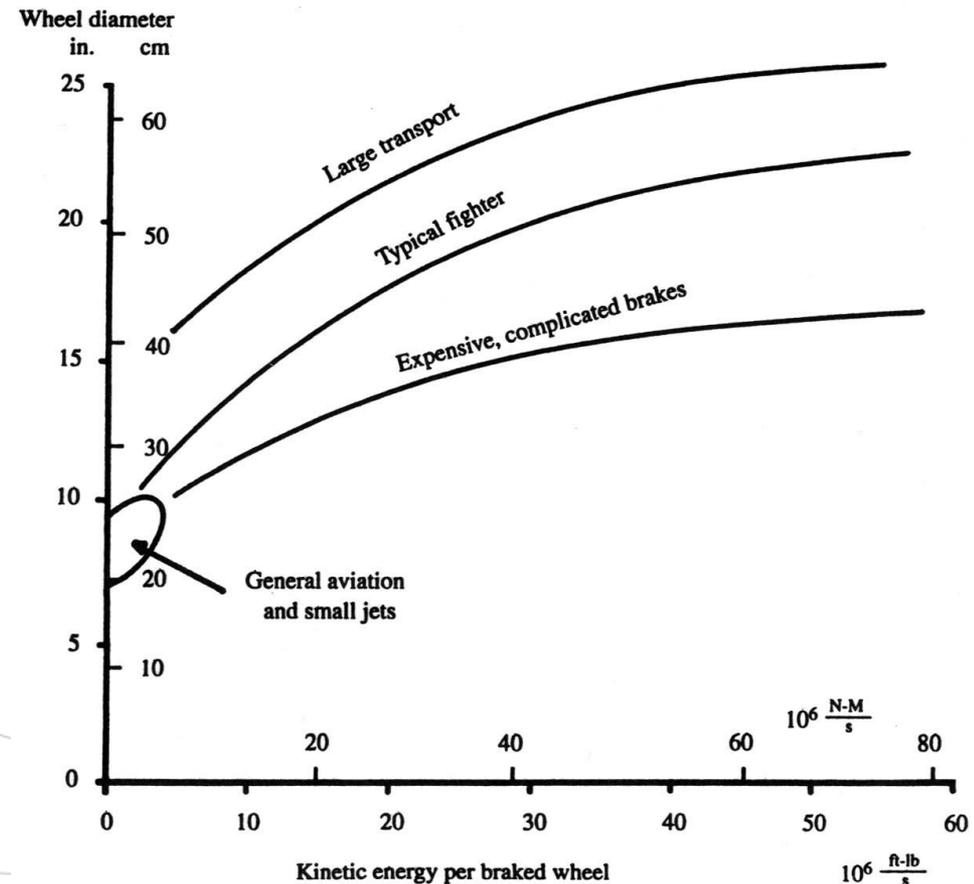
Trem de Aterragem

Superfície	Pressão máxima	
	psi	kPa
Convés de porta-aviões	200+	1380+
Pista militar	200	1380
Pista civil	120	828
Pista de alcatrão, boa fundação	70-90	480-620
Pista de alcatrão, má fundação	50-70	345-480
Pista de metal temporária	50-70	345-480
Erva seca em solo duro	45-60	310-415
Erva molhada em solo mole	30-45	210-310
Terra batida	40-60	275-415
Terra mole	25-35	170-240



## 4. Dimensionamento do pneu

- Travagem:
  - A energia de travagem é dada por:
    - $E = 0,5WV_s^2/g$
  - A energia absorvida por travão é:
    - $E/n_{\text{brake}}$



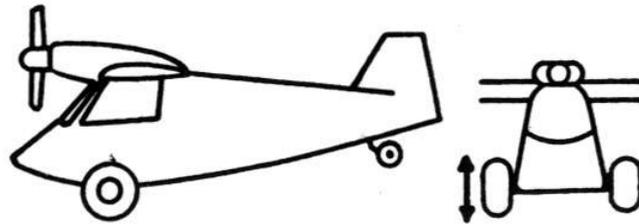


## 4. Dimensionamento do pneu

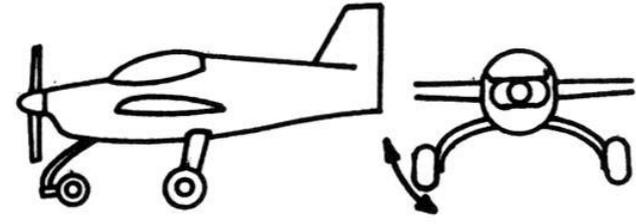
- Envelhecimento:
  - Aquando da determinação do espaço necessário para recolher o trem ou para fazer uma carenagem para a roda é necessário deixar uma margem de 2% a 3% na dimensão do pneu para ter em conta o aumento de tamanho do pneu com o uso
- Deflexão do pneu:
  - $\delta_p = 0,5n_g R / [p(D_p b_p)^{0,5}]$
  - $p$  – pressão do pneu [Pa]
  - $R$  – carga estática aplicada no pneu [N]



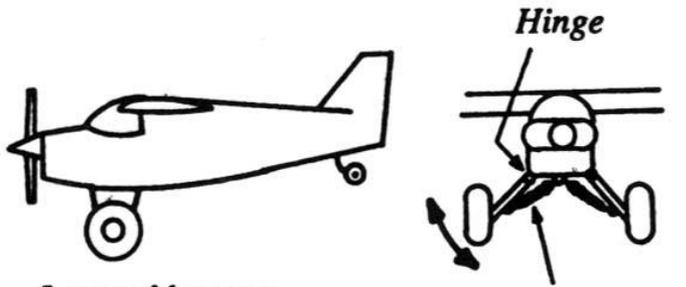
# 5. Molas e amortecedores



Rigid axle



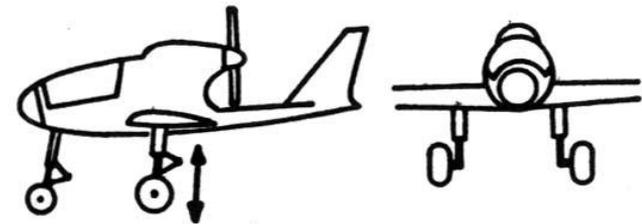
Solid spring



Levered bungee



Rubber bungee

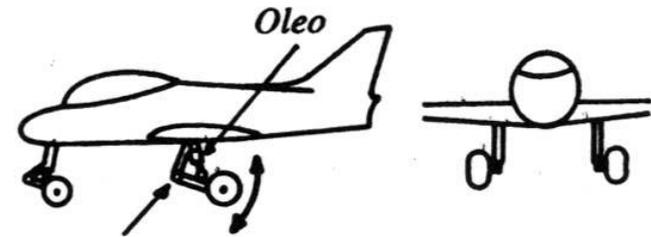


Oleo shock-strut



Triangulated

Hinge



Hinge

Trailing link (or levered)



## 5. Molas e amortecedores

# Deflexão da mola

- Energia cinética vertical:
  - $E = 0,5Wv^2/g$
  - $v = 1\sim 1,5\text{m/s}$  – aviões de passageiros
  - $v = 5\text{m/s}$  – aviões de treino militar
  - $v = 4,6\text{m/s}$  – aviões STOL
  - $v = 6\text{ m/s}$  – aviões embarcados
  - $v = 3\text{m/s}$  – outros aviões



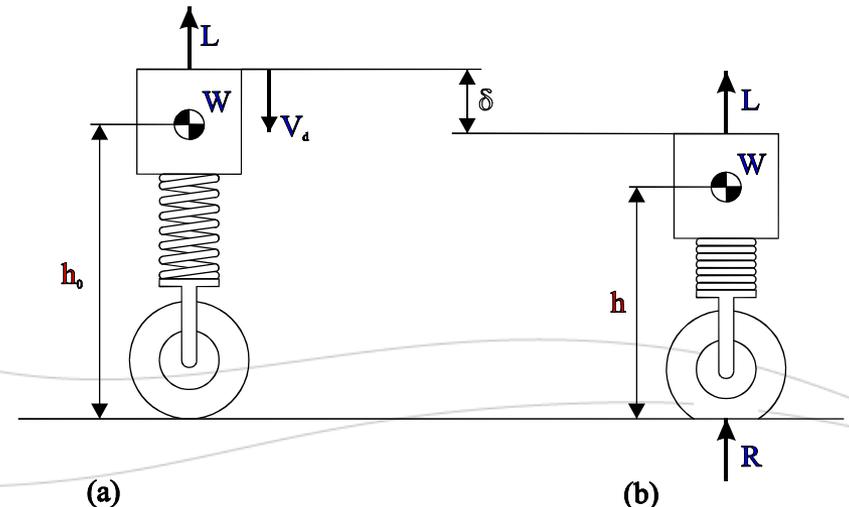
## 5. Molas e amortecedores

# Deflexão da mola

- Energia absorvida pelo trem:
  - $E = \eta R \delta$
  - $\eta$  – eficiência da mola
  - $R$  – carga total média durante a deflexão
  - $\delta$  – deflexão total ou curso da mola

Trem de Aterragem

Tipo	$\eta$
Lâmina de aço	0,50
Mola helicoidal de aço	0,62
Mola de ar	0,45
Bloco de borracha	0,60
Elástico de borracha	0,58
Oleo-pneumático	
- orifício fixo	0,65-0,80
- orifício variável	0,75-0,90
Pneu	0,47





## 5. Molas e amortecedores

# Deflexão da mola

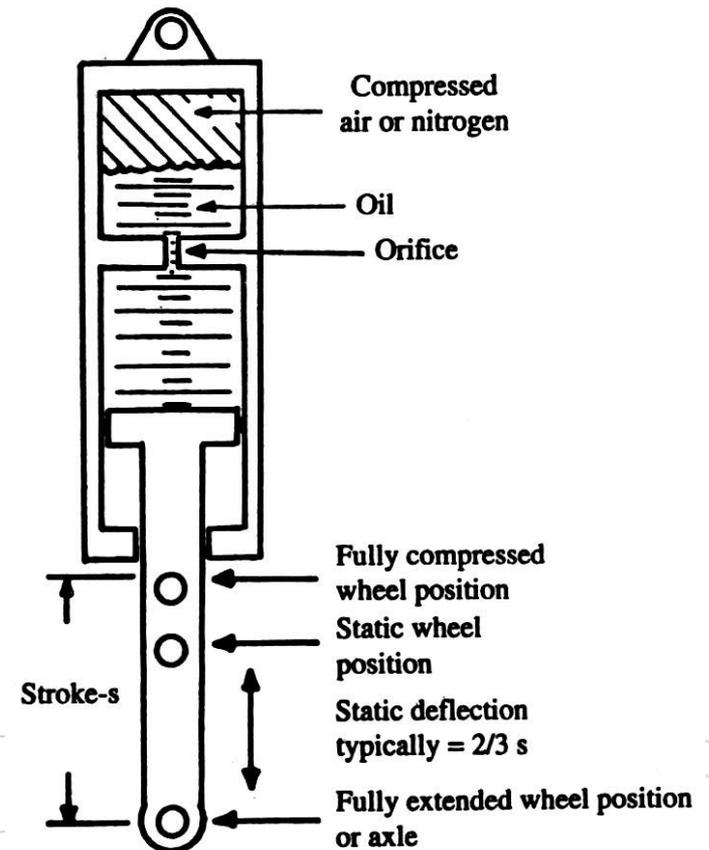
- A energia absorvida pelo trem pode escrever-se:
  - $E = \eta \delta R = (\eta_a \delta_a + \eta_p \delta_p) R$
- As energias têm que ser iguais para a velocidade vertical reduzir para zero:
  - $0,5 W v^2 / g = (\eta_a \delta_a + \eta_p \delta_p) R$
  - $R / W = n_g$
- Deflexão da mola/amortecedor:
  - $\delta_a = (0,5 v^2 / (n_g g) - \eta_p \delta_p) / \eta_a$

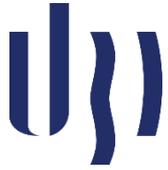


## 5. Molas e amortecedores

# Dimensionamento da mola

- Óleo-pneumático:
  - $D = 1,3(4R/p\pi)^{0,5}$
  - P – pressão interna [Pa]  
(1800psi = 12,42MPa)
  - R – carga [N]



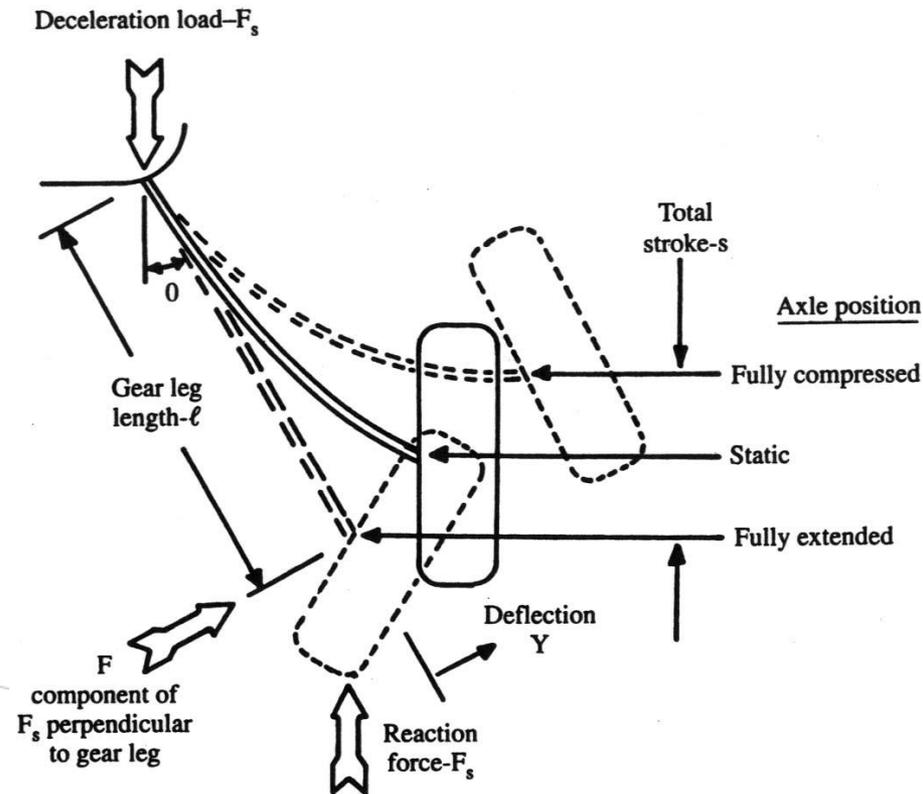
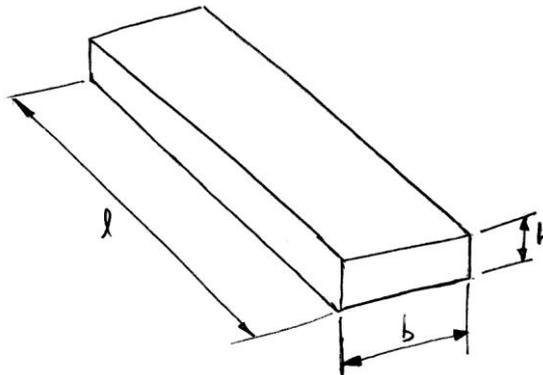


## 5. Molas e amortecedores

# Dimensionamento da mola

- Lâmina:

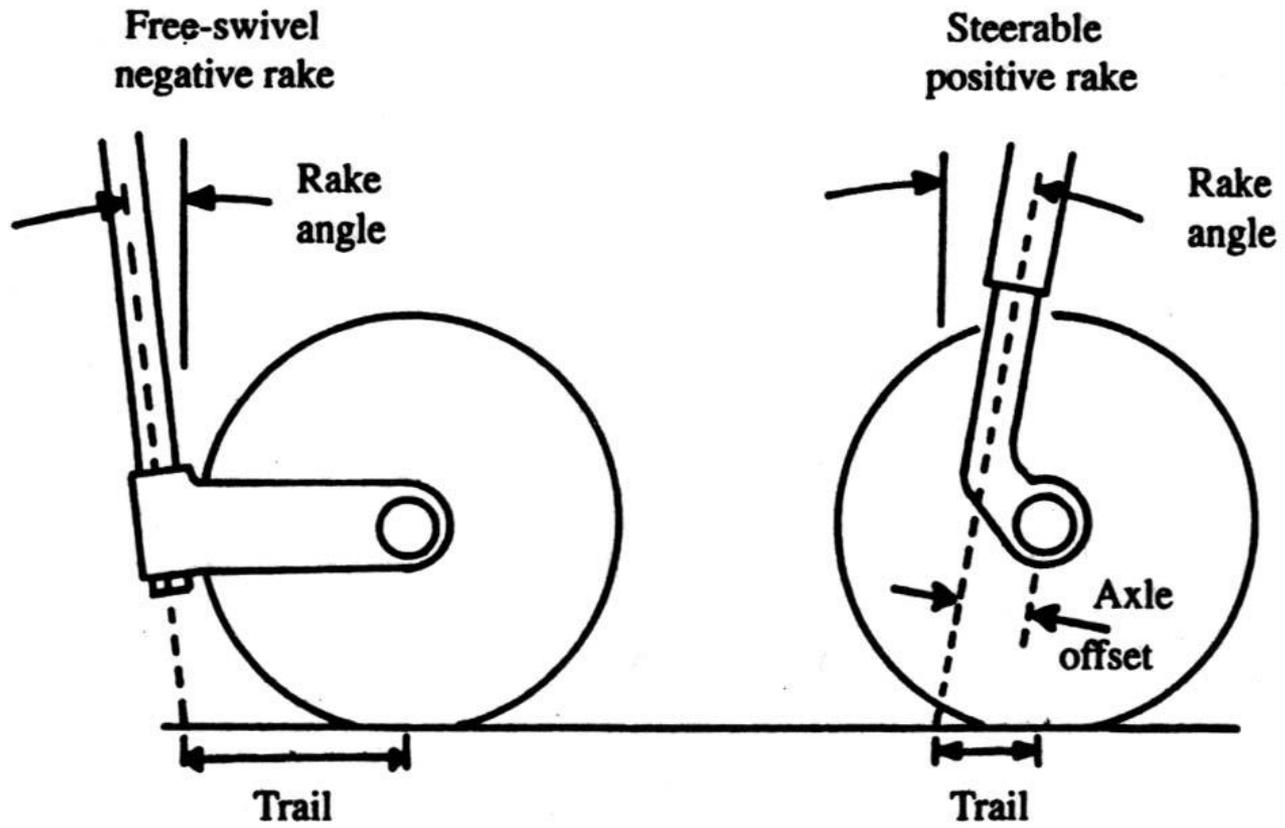
- $F_S = R_M$
- $F = F_S \sin \theta$
- $\delta_a = Y \sin \theta$
- $Y = Fl^3 / (3EI)$
- $\delta_a = F_S \sin^2 \theta \cdot l^2 / (3EI)$
- $I = bh^3 / 12$



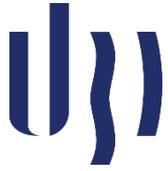


# 6. Direção

Forward  
←



Trem de Aterragem



## 6. Direção

# Roda livre

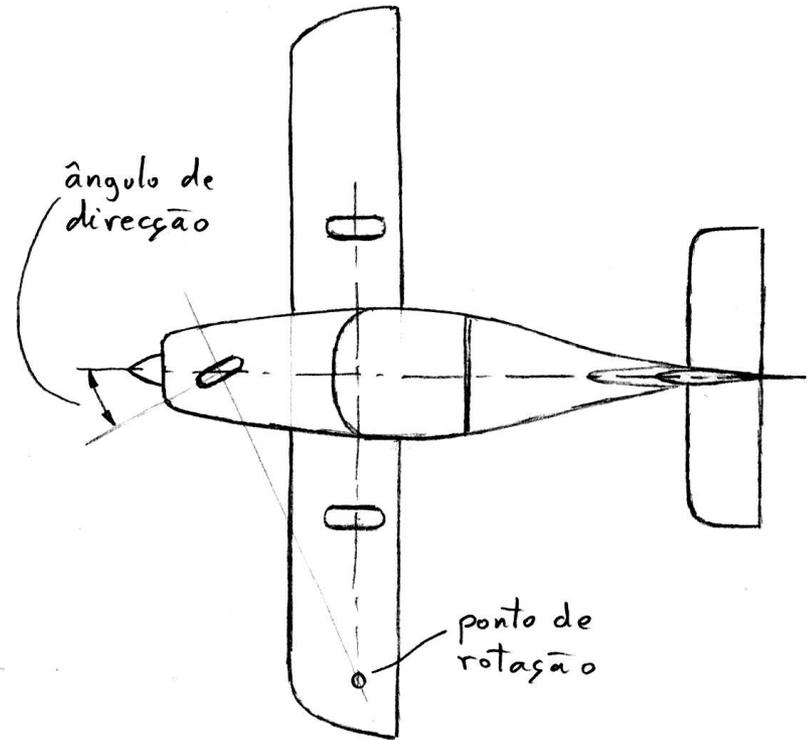
- A direção é controlada com travagem assimétrica nas rodas principais
- “Rake angle” =  $-4^{\circ}$  a  $-6^{\circ}$
- “Trail” =  $0,2R_p$  a  $1,2R_p$
- Para “trail”  $< R_p$  pode ser necessário amortecer a vibração lateral (“shimming”)
- A roda é sempre estável



## 6. Direção

# Roda direcionável

- “Rake angle” =  $7^{\circ}$  a  $15^{\circ}$
- “Trail” =  $0,16R_p$  a  $0,2R_p$
- A roda é instável estaticamente
- A roda é estável em movimento ou com comandos de direção
- O ângulo de direção da roda direcionável deve ser tal que o ponto de rotação da aeronave esteja para dentro da ponta da asa
- O ângulo de direção não deve ser muito pequeno para permitir manobras de reboque

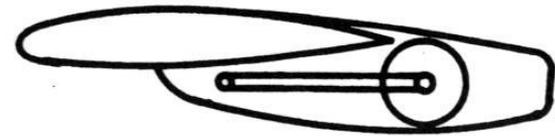




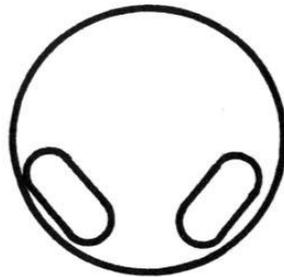
# 7. Geometria de retração



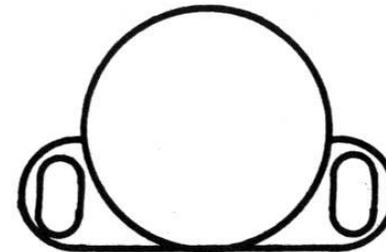
In the wing



Wing-podded



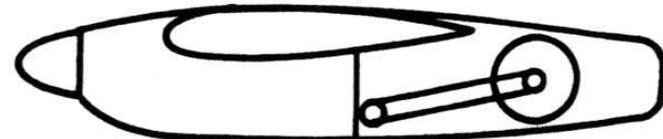
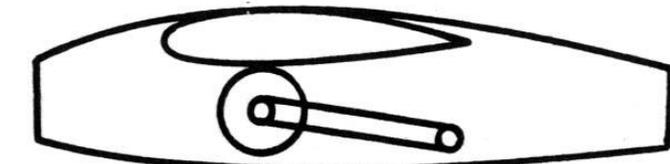
In the fuselage



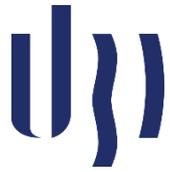
Fuselage-podded



Wing/fuselage junction

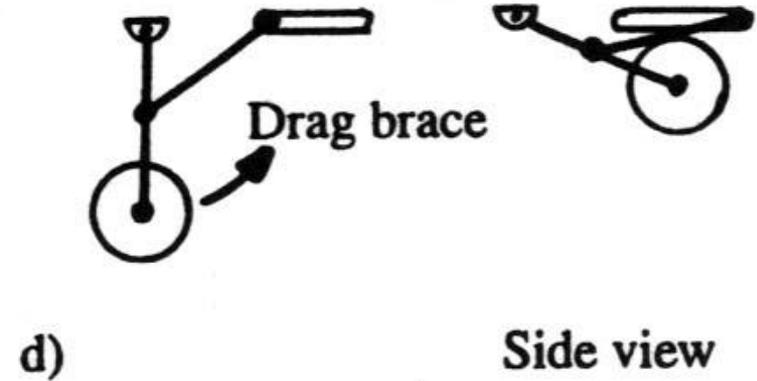
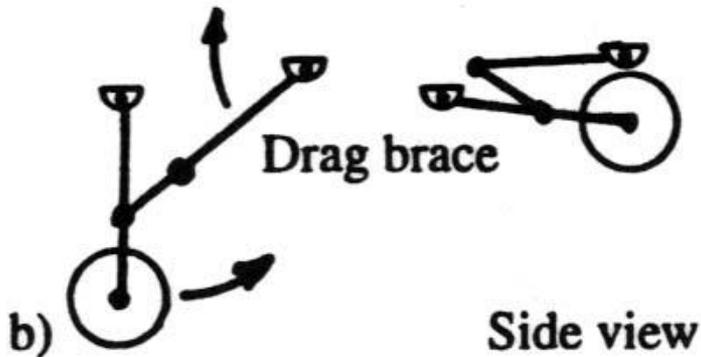
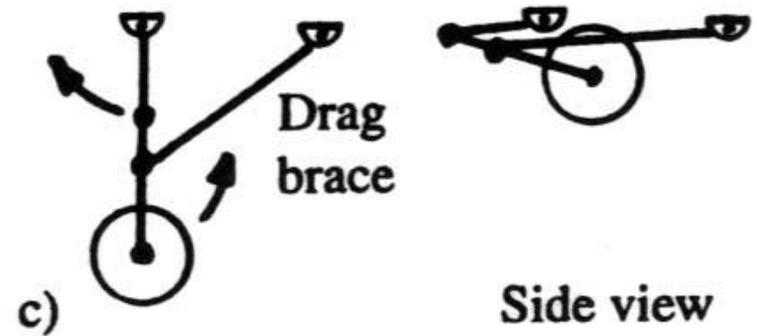
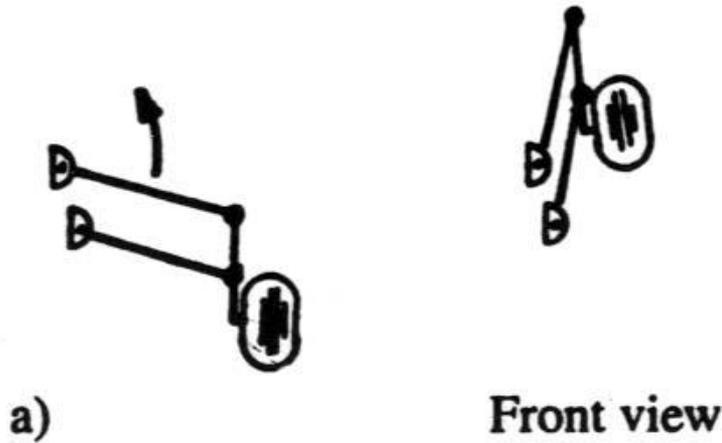


In the nacelle



# 7. Geometria de retração

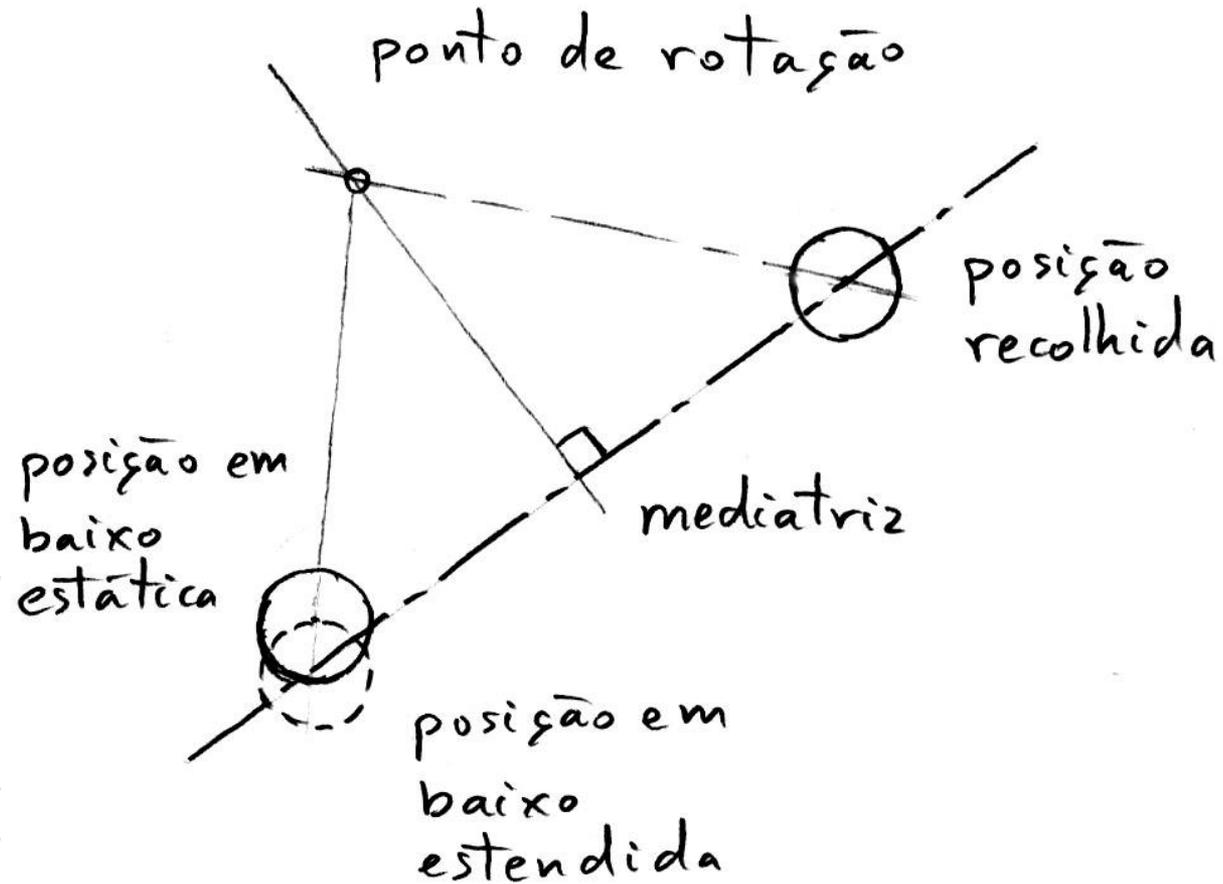
Trem de Aterragem





## 7. Geometria de retração

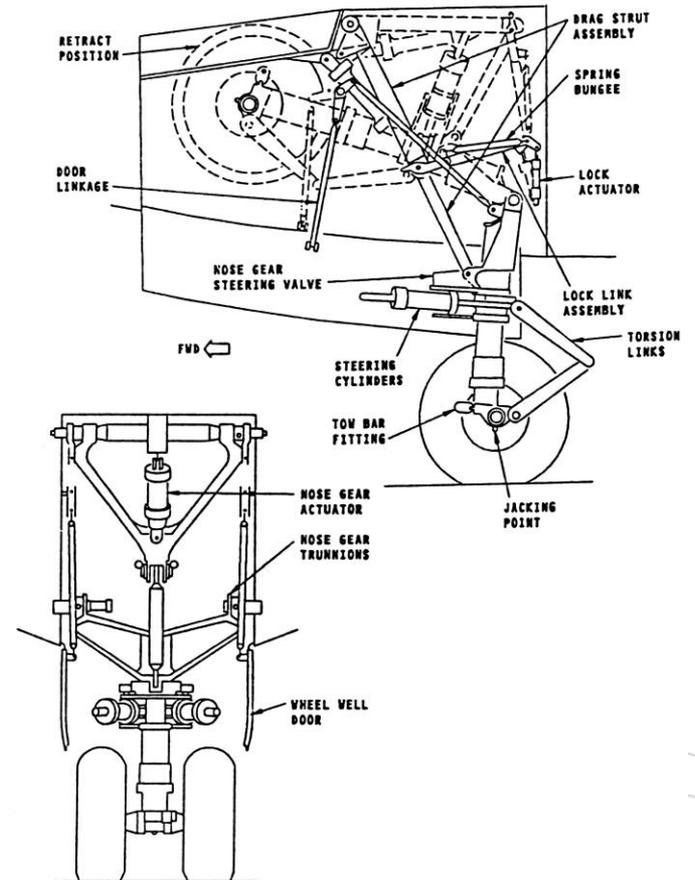
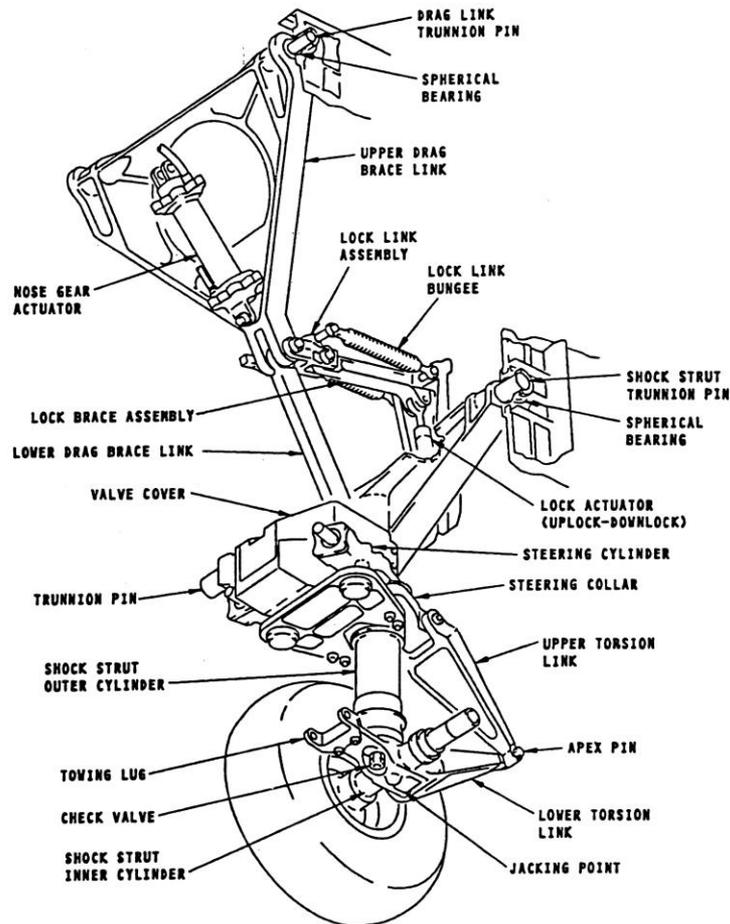
# Determinação de ponto de articulação





# 8. Exemplo de trem

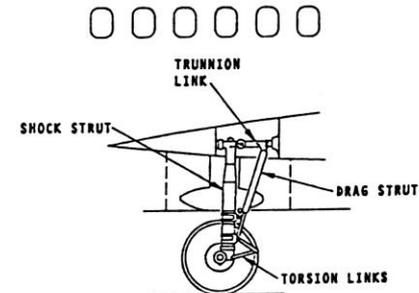
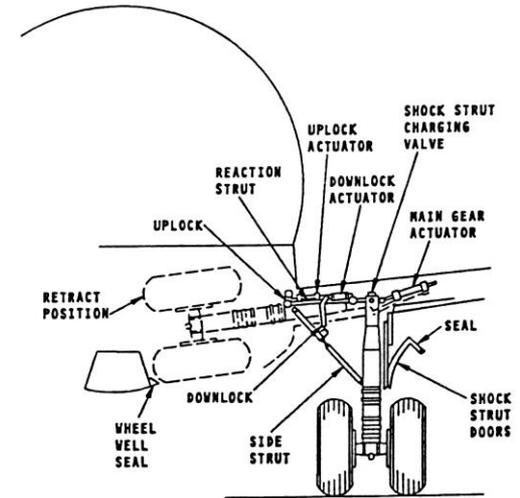
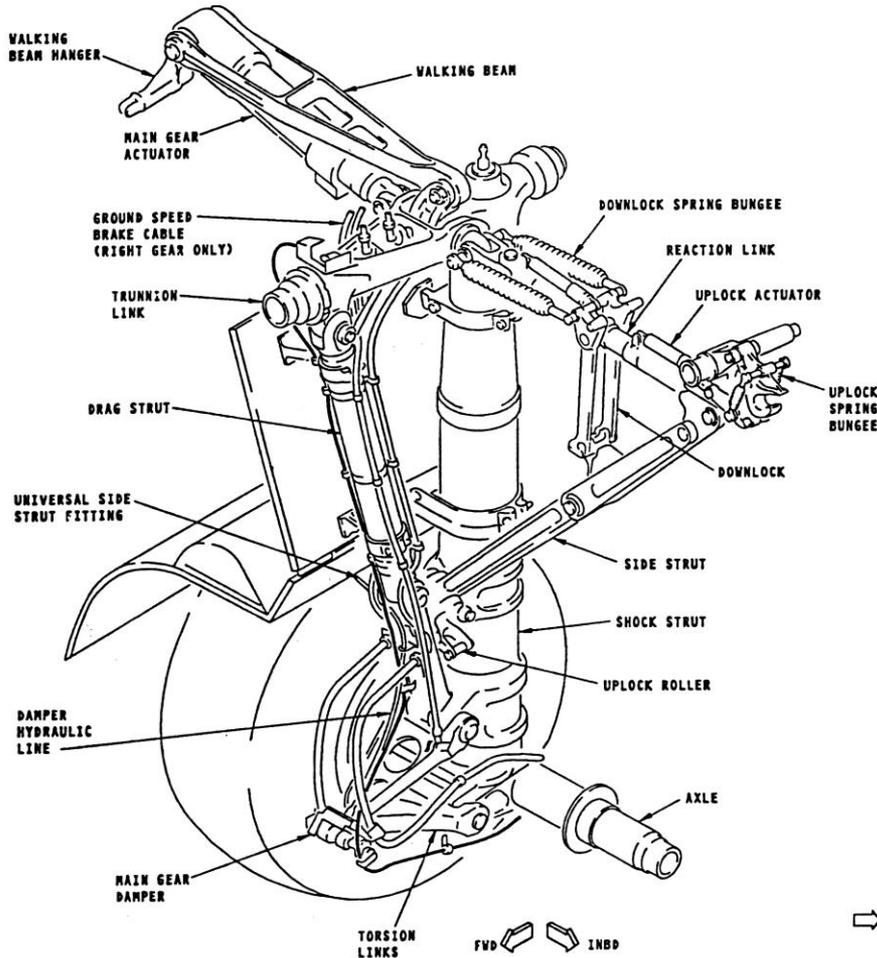
## Nose Gear





# 8. Exemplo de trem

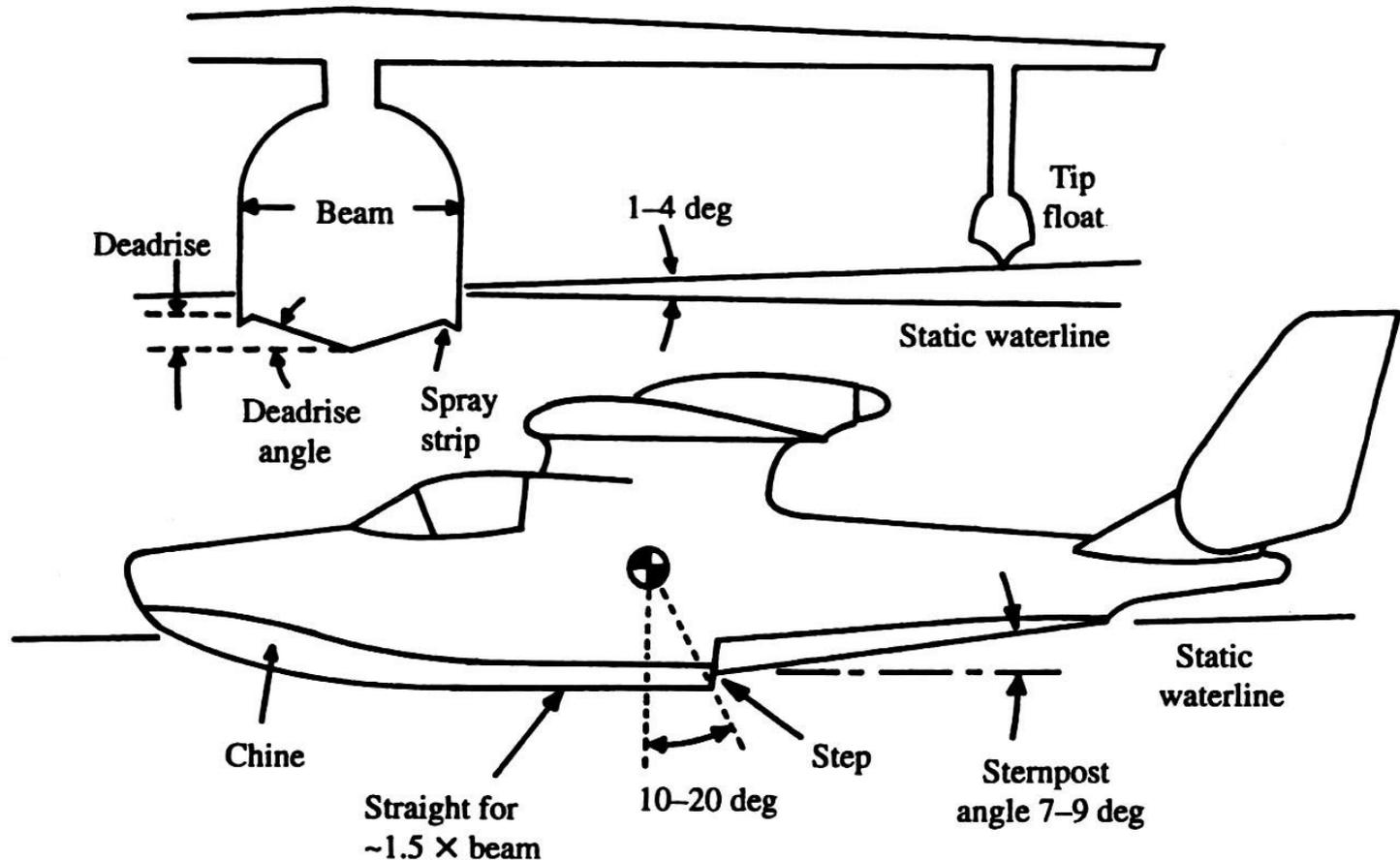
## Wing Main Gear





# 9. Hidroaviões e anfíbios

- Geometria do casco:

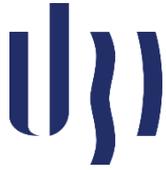




## 9. Hidroaviões e anfíbios

# Geometria do casco

- O casco de um hidroavião ou flutuador tem o intradorso quase plano, visto de lado, para permitir um deslizamento a grandes velocidades
- Um degrau, que pode ser reto ou elíptico, em planta, destrói a sucção na traseira do flutuador
- A secção do intradorso tem a forma de “V” para reduzir as cargas do impacto na água
- Quanto maior for a velocidade de aterragem maior é o ângulo do “V”:
  - $\alpha_{\text{deadrise}} = V_s/3,218-10$  [graus]
    - $V_s$  é a velocidade de perda [km/h]
- Por forma a cortar as ondas este ângulo aumenta para 30–40° junto ao nariz
- Para reduzir o “spray” de água existem abas laterais com uma inclinação de 30°



## 9. Hidroaviões e anfíbios

# Geometria do casco

- A relação entre o comprimento da linha de água e a largura do casco varia entre 6 para aviões pequenos e 15 para aviões grandes
- Quanto mais largo for o casco menor é a resistência hidrodinâmica, mas maior é a carga de impacto
- A altura do degrau é cerca de 5 % da largura do casco e está localizado 10-20 ° atrás do CG
- A distância plana à frente do degrau deve ser cerca de 1,5 vezes a largura do casco
- A inclinação da fuselagem atrás do degrau tem cerca de 8°
- Quando a fuselagem é o próprio casco devem existir flutuadores auxiliares nas asas que devem tocar na água quando o avião se inclina 1°



## 9. Hidroaviões e anfíbios

# Linha de água

- Para determinar a linha de água é necessário determinar o volume da fuselagem que fica submerso
- Desenha-se uma estimativa da linha de água
- Determina-se o volume submerso
- Multiplica-se esse volume pela massa volúmica da água ( $1000 \text{ kg/m}^3$ ) para saber qual é a massa suportada por esse volume de água deslocada
- O centroide deste volume deve coincidir com o CG da aeronave
- Repetir o processo até o volume submerso suportar o peso da aeronave e o centro de flutuação coincidir com o CG



9. Hidroaviões e anfíbios

# Desempenho

- O coeficiente de fricção para efeitos de cálculo da descolagem e aterragem pode considerar-se como sendo 0,10-0,15

Trem de Aterragem