



PME3380 - Modelagem de Sistemas Dinâmicos
Prof. Dr. Renato Maia Matarazzo Orsino

Modelagem da dinâmica plana de aeronave supersônica de passageiros durante fase de *free-roll* da aterrissagem

Apresentação referente ao To de PME3380-2023

Grupo K

Lucas Retore Carboni - 12676091

Roberto Tetsuo Hamaoka - 10334770

Vitor Lucas Buter - 12555700

1. Introdução

2. Objetivos

- a. Objetivo 1
- b. Objetivo 2

3. Escopo

4. Metodologia

- a. Critérios de análise
- b. Hipóteses simplificadoras
- c. Ferramentas

5. Modelo Físico

- a. Modelo proposto e coordenadas
- b. Parâmetros físicos do sistema
- c. Vetor de estados
- d. Entradas do sistema

- Avanços tecnológicos quanto às limitações do passado
 - Melhorias em relação ao Concorde.
- Reinvestimento em aviação comercial supersônica
- Implicações do voo supersônico
 - Otimizado para velocidade de cruzeiro supersônica – asa em delta;
 - Elevação da taxa de descida;
 - Maior ângulo de arfagem no pouso.



Boom Supersonic

Fonte: PC Magazine

1. Determinar os esforços nos trens de pouso no momento do toque da aeronave no solo
 - 30% dos acidentes aéreos ocorrem na fase de pouso da aeronave (ICAO);
 - O catrapo (*hard landing*) é comum, tem causas diversas e pode ser ou não desejado;
 - Dakar 1977 - Concorde sofre danos estruturais em pouso a 4m/s verticais.



Desmorte após danos em Dakar
Fonte: Heritage Concorde

2. Investigar a estabilidade do ângulo de arfagem da aeronave em resposta a diferentes entradas

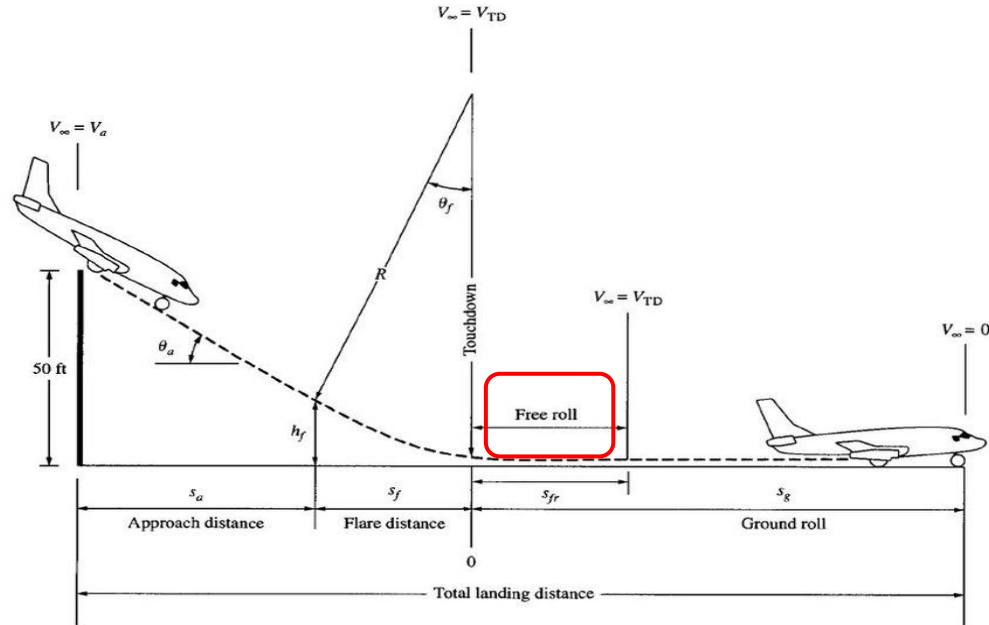
- O ângulo de arfagem no pouso de aeronaves supersônicas é superior aos convencionais;
- A taxa de variação do ângulo de arfagem interfere no conforto e segurança;
- Ângulos de arfagem altos são aerodinamicamente instáveis (CAUGHEY D).



Comparação do ângulo de arfagem entre o Concorde e um Boeing 737

Fonte: Aeroclass, Asia Times

- Fase de *free-roll*: sem frenagem atuante



Fonte: (Gangoli Rao et al, 2022)

- *Federal Aviation Administration, DOT; Part 23; Subpart C–Structure*
§ 23.471 General.

*The limit ground loads specified in this subpart are considered to be **external loads and inertia forces that act upon an airplane structure.**[...]*

§ 23.473 Ground load conditions and assumptions.

*(g) No inertia load factor (LF) used for **design purposes may be less than 2.67**, nor may the **limit ground reaction load factor be less than 2.0 at design maximum weight**, unless these lower values will not be exceeded in taxiing at speeds up to takeoff speed over terrain as rough as that expected in service*

- Em condição normal de pouso: em LF superior à 2,67 não se garante segurança
- Em condições de peso máximo: em LF superior à 2,0 não se garante segurança

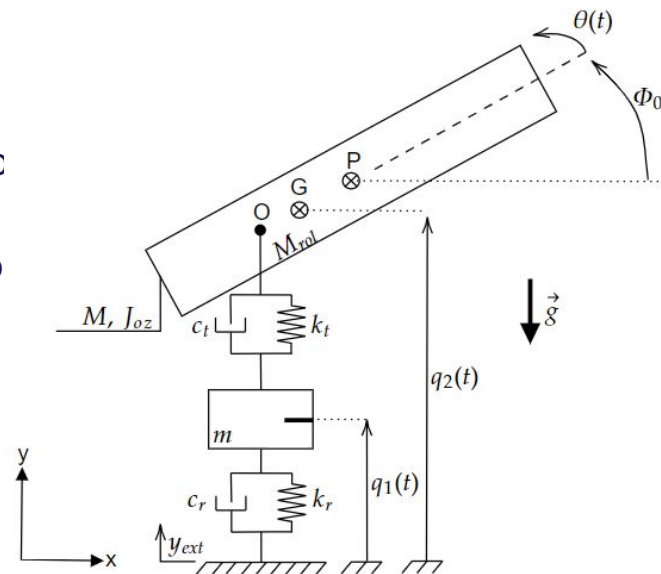
- Estabilidade do ângulo de arfagem
 - Analisada a partir das ferramentas aprendidas no curso.
- Conforto
 - Desconforto é trazido majoritariamente pela aceleração (de WINKEL et al, 2023):
 - Até $0,28 \text{ m/s}^2$ é confortável;
 - Acima de $2,12 \text{ m/s}^2$ é desconfortável;
 - Aceleração de $1,23 \text{ m/s}^2$ é aceitável.
 - Aceleração do assento mais crítico obtida e valor eficaz (a_{rms}) na série temporal tomado para análise.

- Pouso nivelado;
- Ausência de atrito viscoso nos mancais dos pneus;
- Corpos e vínculos rígidos;
- Ausência de vento de cauda, proa ou *windshear*;
- Ausência de aquaplanagem;
- Centro de massa no pouso não variante;
- Coeficientes aerodinâmicos constantes em relação à corda e iguais ao valor em meia-corda;
- Efeito solo desprezível;
- Forças aerodinâmicas aplicadas no centro da asa (meia-corda);
- Trem de pouso com movimento restrito na vertical.

- *Wolfram Mathematica 13.2* - equacionamento
- *MATLAB MathWoks* - simulação numérica

- Coordenadas

- $q_1(t)$: posição vertical do conjunto de rodas do trem de pouso;
- $q_2(t)$: posição vertical do centro de massa do avião;
- $\Theta(t)$: desvio do ângulo de arfagem inicial, no momento do contato com o solo (Φ_0);
- P: Centro de pressão do avião;
- G: Centro de gravidade do avião;
- O: Ponto de fixação do trem de pouso à fuselagem;
- y_{ext} : deslocamento externo vindo da pista.



Modelo físico proposto

Fonte: Autoria própria

- Parâmetros:

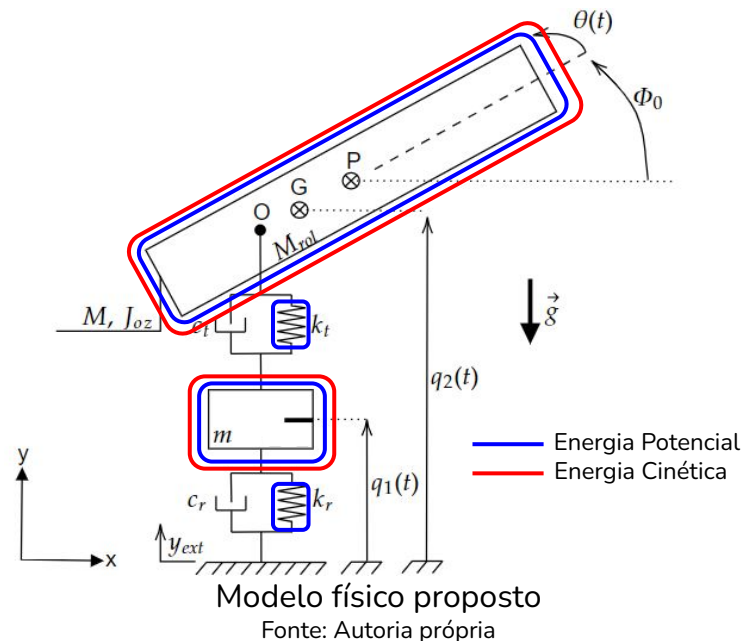
Símbolo	Parâmetro	Magnitude	Unidade
$M_{MÁX}$	Massa máxima de aterrissagem	88	ton
V_{Aprox}	Velocidade de aproximação	280 - 300	km/h
V_{vert}	Velocidade vertical de aproximação	3	m/s
k_t	Constante de mola do trem de pouso	4 418	kN/m
C_t	Constante de amortecimento do trem de pouso	25,5	kN/m
k_r	Constante de mola do pneu	2 913	kN/m
C_r	Constante de amortecimento do pneu	17,4	kN/m
Φ	Ângulo de arfagem no momento do toque	11°	Graus
D_{OG}	Distância do nariz ao centro de massa	30,3	m
D_{CP}	Distância do nariz ao centro de pressão	27,5	m
$D_{TP,t}$	Distância do nariz ao trem de pouso traseiro	32,5	m
$h_{TP,t}$	Altura do trem de pouso traseiro	3,8	m

- Meios de armazenamento de energia
 - O número de meios de armazenamento de energia do sistema indica o número de componentes do vetor de estados (HILL, 2015);
 - 6 meios (4 de potencial e 2 de cinética);
 - O vetor de estados:

$$\mathbf{x} = \begin{pmatrix} q_1(t) \\ q_2(t) \\ \theta(t) \\ \dot{q}_1(t) \\ \dot{q}_2(t) \\ \dot{\theta}(t) \end{pmatrix} \iff \mathbf{x} = \begin{pmatrix} \mathbf{q} \\ \mathbf{v} \end{pmatrix}$$

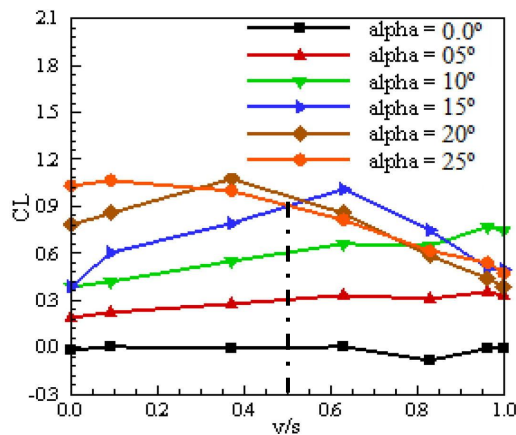
\mathbf{q} é o vetor de coordenadas generalizadas, ou seja, q_1, q_2, θ .

\mathbf{v} é o vetor de quasi-velocidades, ou seja, $\dot{q}_1, \dot{q}_2, \dot{\theta}$.

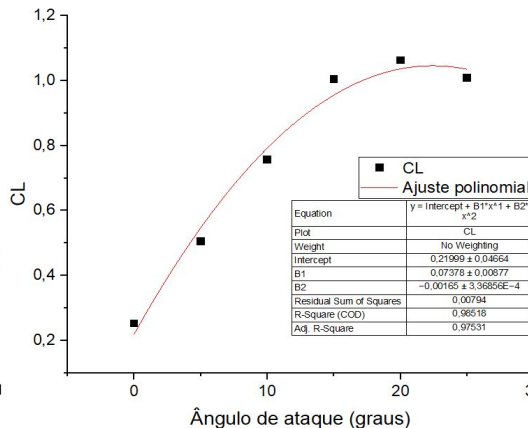


- Arrasto e sustentação

- Dados colhidos de testes de asa em delta enflechada em túnel de vento com Mach = 0,1 e $Re = 8,37 \cdot 10^5$ – aerodinâmica de baixa velocidade.



Fonte: (MOHAMED et al, 2022)



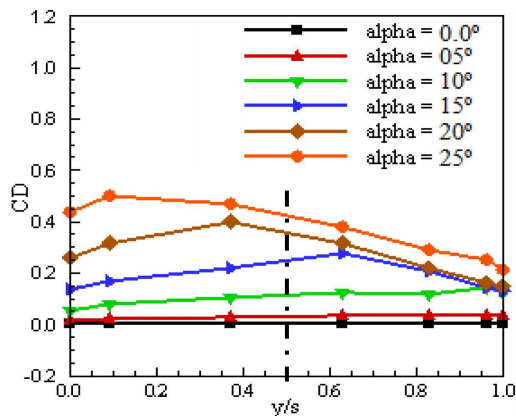
Fonte: Autoria própria

$$C_L = -0,00165\alpha^2 + 0,07378\alpha + 0,21999$$

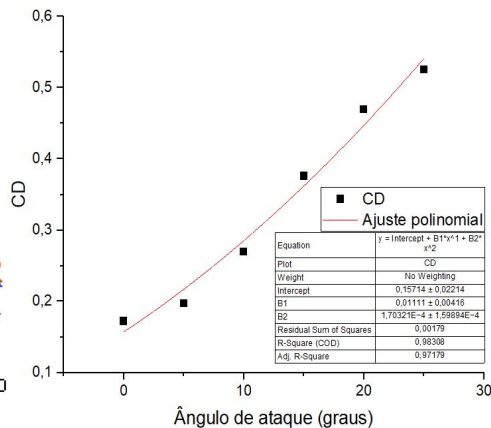
$$L = C_L \cdot S \cdot \frac{\rho \cdot \dot{x}^2}{2}$$

- Arrasto e sustentação

- Dados colhidos de testes de asa em delta enflechada em túnel de vento com $Mach = 0,1$ e $Re = 8,37 \cdot 10^5$ – aerodinâmica de baixa velocidade.



Fonte: (MOHAMED et al, 2022)



Fonte: Autoria própria

$$C_D = 0,00017\alpha^2 + 0,01111\alpha + 0,15714$$

$$D = C_D \cdot S \cdot \frac{\rho \cdot \dot{x}^2}{2}$$

- Abordagem proposta
 - Modelagem proposta pelo *University of Michigan Transportation Research Institute* para caminhões pesados (GILLESPIE, 1992) – já utilizada em trabalhos aeronáuticos (*Dynamic model of aircraft landing* de Suharevs et al., 2016).

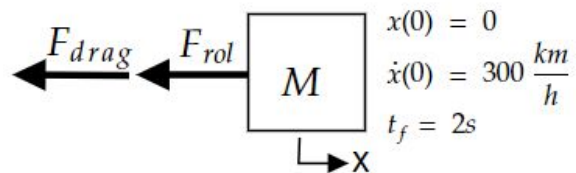
$$F_{rol} = \mu_{rol} \cdot N \begin{cases} N = W - L \\ \mu_{rol} = (0,0041 + 0,000041\dot{x}) \cdot C_{pav} \end{cases}$$

Onde C_{pav} é o coeficiente do pavimento, sendo 1.0 para concreto liso, 1.2 para concreto gasto e 1.5 para asfalto quente (GILLESPIE, 1992).

- Abordagem proposta
 - O modelo proposto não aborda a dinâmica bidimensional do trem de pouso;
 - **Solução:** Modelar a resistência ao rolamento como um momento de perturbação equivalente avião
 1. Calcular a força de resistência no pneu;
 2. Transportá-la ao centro de massa do avião;
 3. Obter o sistema de forças equivalente em relação ao polo O.

$$M_{oz}^{rol} = F_{rol} \times \vec{\rho}_{GO}$$

- Imposição de \dot{x}
 - A velocidade horizontal é também entrada do modelo na fase de *free-roll*;
 - Seus dados são obtidos a partir da solução do seguinte sistema:

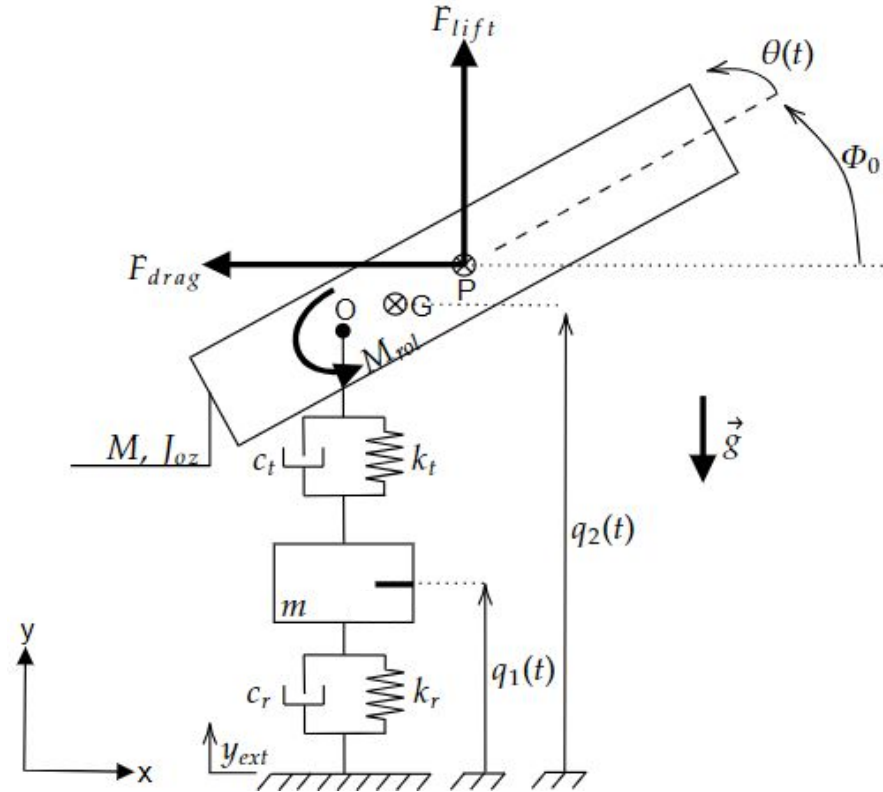


$$\begin{bmatrix} x \\ \dot{x} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_2 \\ (F_{drag} + F_{rol}) / M \end{bmatrix}$$

Modelo Físico

Modelo final



Modelo físico final

Fonte: Autoria própria

- SUHAREVS, A. et. al. Dynamic Model of Aircraft Landing. *Transport and Aerospace Engineering*, v. 3, 12 2016
 - Apresenta apenas equacionamento de modelo físico bidimensional para pouso semelhante ao proposto;
 - Descreve forças externas (fora do *free-roll*);
 - Aplica método de Newton-Euler.
- SIVAPRAKASAM, SIVAKUMAR & HARAN, A. Mathematical model and vibration analysis of aircraft with active landing gears. *Journal of Vibration and Control*. v 21, p. 229-245, 01 2023
 - Descreve matrizes de amortecimento, rigidez e massa para a dinâmica tridimensional do avião;
 - Vetor de estados utilizado análogo aplicado ao modelo tridimensional;
 - Indica caminhos para inclusão de controle na suspensão do trem de pouso.

- CROSS, R. Origins of rolling friction. Physics Education, IOP Publishing, v. 52, n. 5, p. 055001, jun 2017. Disponível em: <<https://dx.doi.org/10.1088/1361-6552/aa77b4>>
- GILLESPIE, T. A. T Fundamentals of Vehicle Dynamics. Society of Automotive Engineers, 1992. ISSN 9781560911999.
- CAUGHEY, D. A. Introduction to Aircraft Stability and Control Course Notes, 2011. Disponível em: <https://courses.cit.cornell.edu/mae5070/Caughey_2011_04.pdf>
- Karpenko, M. (2022). Landing gear failures connected with high-pressure hoses and analysis of trends in aircraft technical problems. Aviation, 26(3), 145–152. <<https://doi.org/10.3846/aviation.2022.17751>>
- Gangoli Rao, Arvind & S.B.M, Bosma, & A.A.L.A.X.A.V., Eggermont, & R., Heuijerjans, & S.A., Leest, & F., Kruijssen, & M.A., Meijburg, & K.L.L., Morias, & den, Oudenalder, & B., Peerlings, & Lv, Peijian. (2013). EuroFlyer Final Report. 10.13140/RG.2.2.26923.87847. Citado no slide (ESCOPO)
- ICAO. Accidents Statistics, jul 2023. <https://www.icao.int/safety/iStars/Pages/Accident-Statistics.aspx>>.

- de WINKEL, K. N. et al. Standards for passenger comfort in automated vehicles: Acceleration and jerk. Applied Ergonomics, v. 106, p. 103881, 2023. ISSN 0003-6870. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0003687022002046>>.
- HILL, R. System Dynamics and Control: Module 27b - Choosing State Variables. University of Detroit Mercy, 2015. Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=RdAZNUfWDpQ>>.
- HERITAGE CONCORDE. Explore the world of Concorde. Disponível em: <<https://www.heritageconcorde.com/>>.
- PASH G, SEBASTIAN J, JOHNSON N. Analysis of a Aircraft Landing Gear Suspension System, 2018, p. 5-6. Disponível em <https://noahjohnson.wordpress.ncsu.edu/files/2018/11/mae_315_project_1-1.pdf>.
- SLEEPER R, DREHER R. Tire Stiffnes and Damping Determined from Static and Free-Vibration Tests, 1980, p10-11, 26. Disponível em: <<https://ntrs.nasa.gov/api/citations/19800018802/downloads/19800018802.pdf>>.

Apêndice 1

Estimativa de massa



$$\rho_{fibra} = 1550 \text{ Kg}/m^3$$

$$\rho_{alum} = 2710 \text{ Kg}/m^3$$

$$m_{conc} = 78700 \text{ Kg.}$$

$$\forall = \frac{m_{conc}}{\rho_{alum}}$$



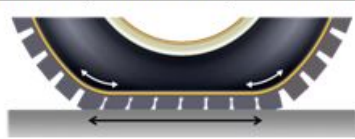

$$m_{model} = 0.7 \cdot \forall \cdot \rho_{fibra} + 0.3 \cdot m_{conc}$$

Apêndice 2

Fatores influentes na resistência ao rolamento

- Problemas enfrentados

- **Diversas causas:** colisão nos contatos de duas superfícies rugosas ou não lisas, compressão e expansão do material na região de contato ou por sua deformação permanente (CROSS, 2017).
- **Alta influência de fatores externos:** Altamente influenciado por fatores externos como temperatura e pressão dos pneus, velocidade, material da banda e geometria do pneu.

What	Surface of tire and air	Tire tread				Sidewall and bottom part		
How	Air circulation	Slippage on ground	Deformation hence dissipation of energy					
	bending		compression	shearing	bending	shearing		
								
Contribution	< 15%		60 to 70%				20 to 30 %	