Física Geral I
F -128

Aula 05
Forças Dissipativas

Plano da Aula

- Força de atrito
- Força de arraste

Questão 1

Um paralelepípedo é puxado sobre o asfalto. Em qual situação o atrito é maior:

a) quando o lado de menor área está em contato com o chão.

b) quando o lado de maior área está em contato com o chão.

c) a intensidade da força de atrito independe da área de contato com o chão.

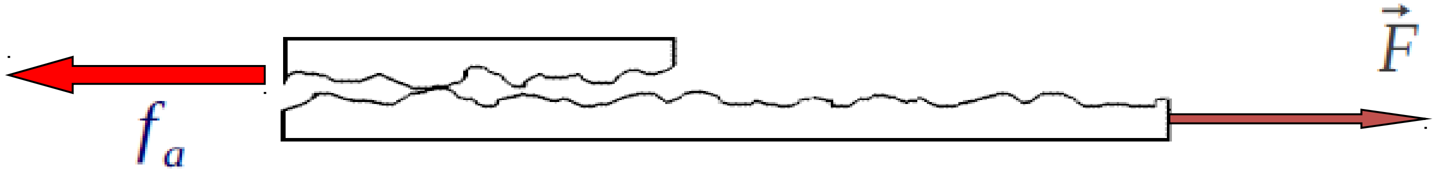
Força de Atrito

Leonardo da Vinci (1452-1519): um dos primeiros a reconhecer a importância do atrito no funcionamento das máquinas.

Leis de atrito de da Vinci:

1) a área de contato não tem influência sobre o atrito.
2) dobrando-se a carga de um objeto, o atrito também é dobrado.

Guillaume Amontons (1663-1705): redescoberta das leis de da Vinci; percebe que o atrito é devido à rugosidade das superfícies.

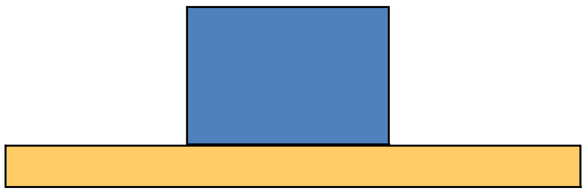


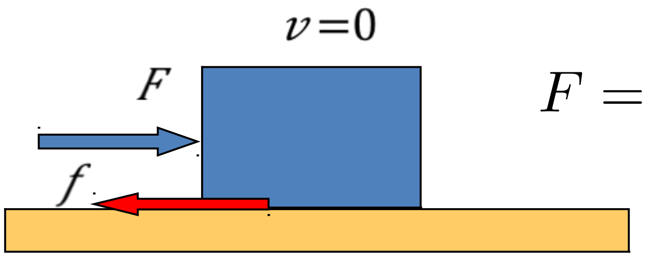
Charles August Coulomb (1736-1806): o atrito cinético é proporcional à força normal e independente da velocidade

Lei de Amontons-Coulomb: $\left| f_a \right| = \mu \left| N \right|$

Atrito estático e atrito cinético

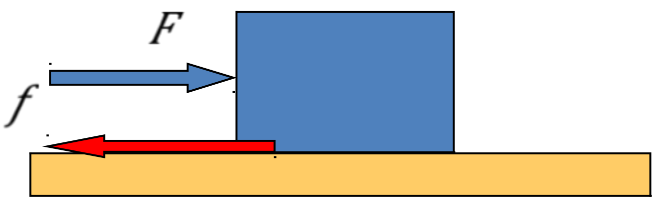
Ausência de forças horizontais



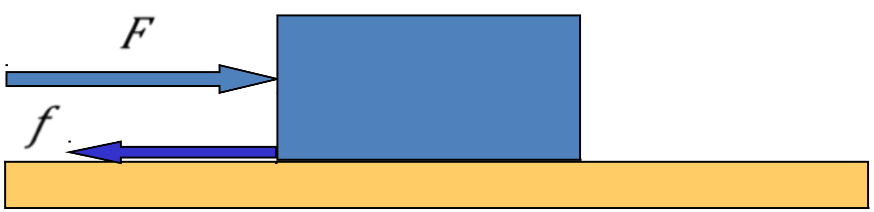


$$F = f$$

A força de atrito estático é máxima ($= \mu_e N$) na *iminência* de deslizamento.



$$0 < f < \mu_e N$$



$$F > f$$

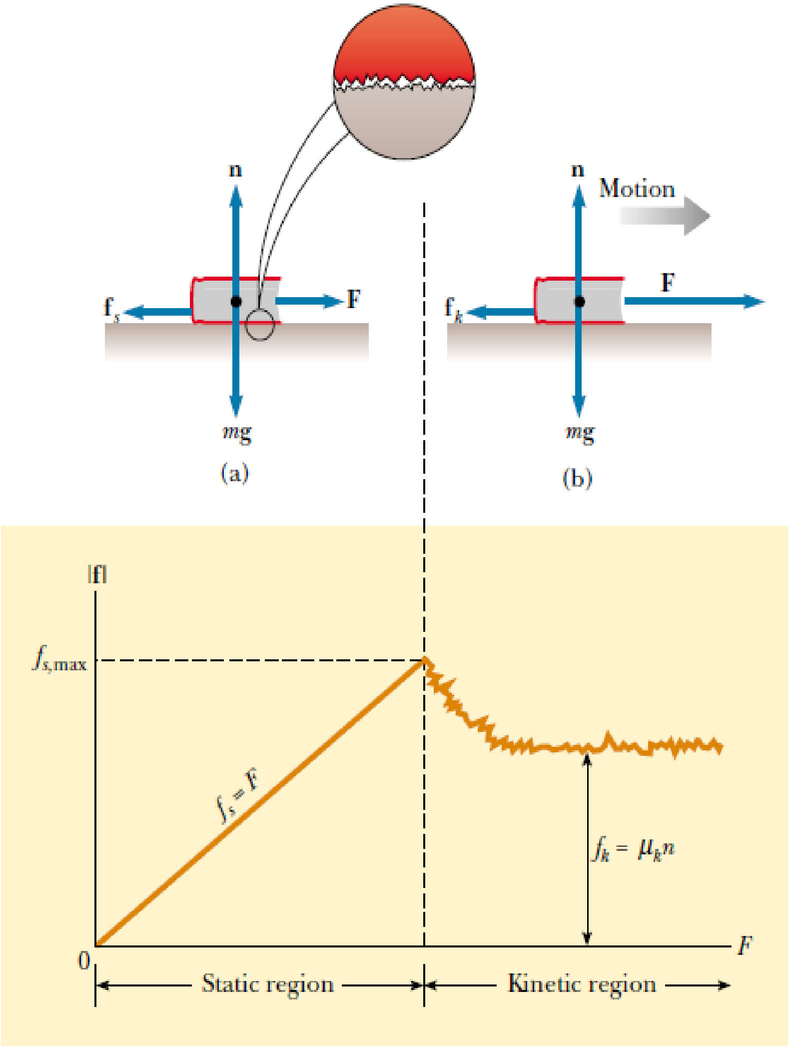
A força de atrito sobre um corpo tem sempre sentido oposto ao seu movimento (ou à tendência de movimento) em relação ao outro corpo.

Atrito estático e atrito cinético

$$\mu_e > \mu_c$$

Os coeficientes de atrito dependem das <u>duas</u> superfícies envolvidas.

O coeficiente de atrito cinético independe da velocidade relativa das superfícies.



Questão 2

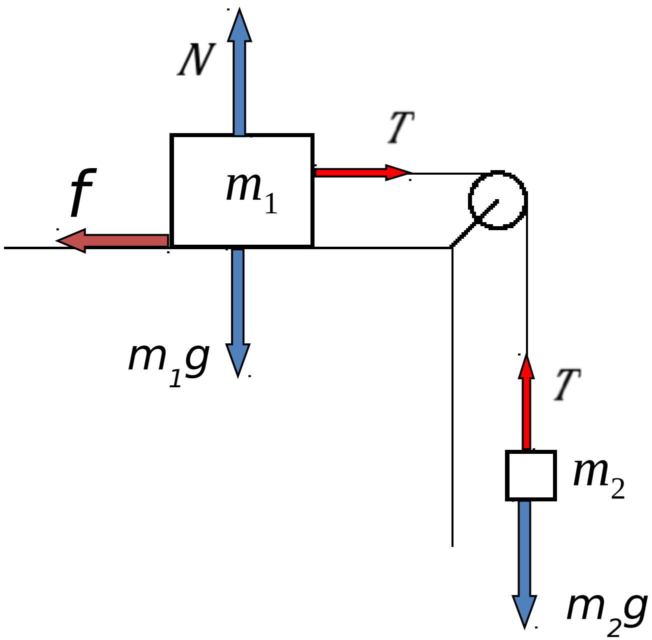
O que é mais vantajoso na hora de você puxar o mala do seu irmão (i.e., em qual situação você faz menos esforço)?

a) situação a.
b) situação b.
c) dá na mesma.

Coeficientes de atrito

Material	μ_e	μ_c
Vidro / vidro	0,94	0,40
Aço / aço	0,74	0,57
Alumínio / aço	0,61	0,47
Cobre / aço	0,53	0,36
Madeira / madeira	0,25 – 0,50	0,20
Metal / metal (lubrificado)	0,15	0,06
Gelo / gelo	0,10	0,03
Juntas dos ossos	0,01	0,003

Medida de forças de atrito: sistema de blocos



Sistema em movimento:

$$m_2 g - f = (m_1 + m_2)a$$

$$m_2 g - \mu_c m_1 g = (m_1 + m_2)a$$

$$a = \frac{m_2 - \mu_c m_1}{m_1 + m_2} g$$

Sistema em equilíbrio na iminência de movimento: $a = 0$

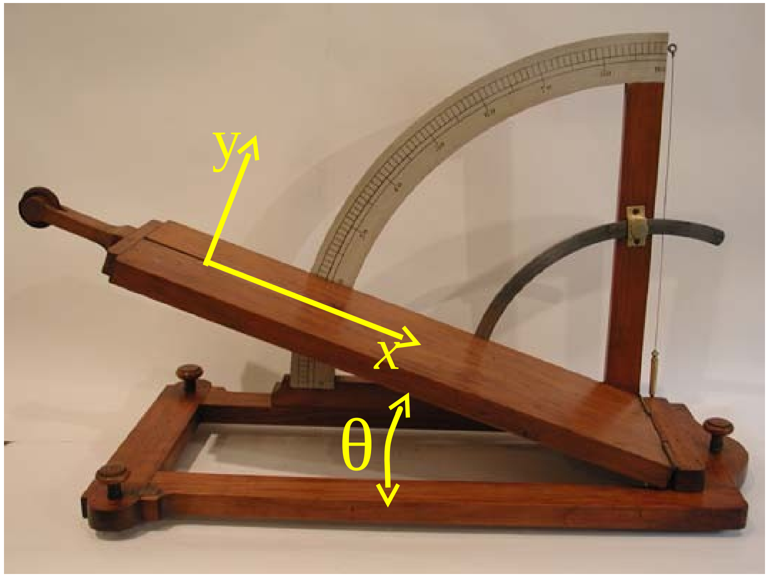
Então:

$$m_2 g = \mu_e m_1 g \longrightarrow \mu_e = m_2/m_1$$

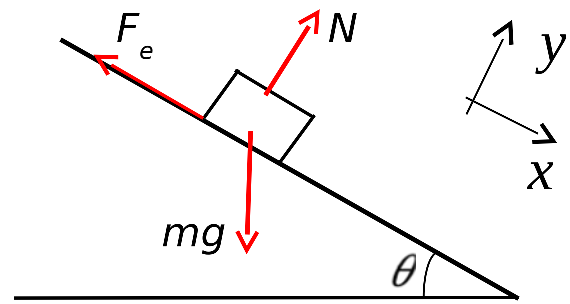
(determinação do coeficiente de atrito estático)

Medida de forças de atrito: plano inclinado

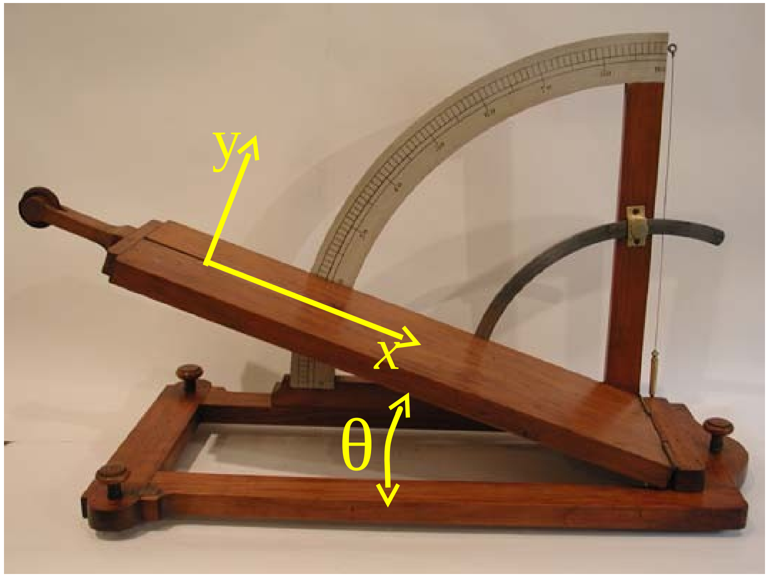
Plano inclinado para aulas de física (1850)



Bloco de massa *m* na iminência de deslizar num plano inclinado:



Questão 3



Se não houver atrito, qual a força resultante no bloco?

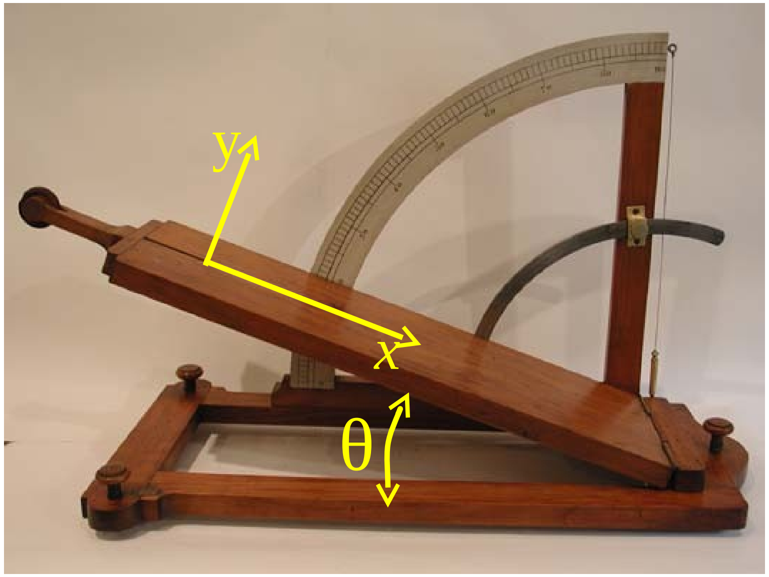
a) a componente da força peso na direção do plano inclinado

b) a componente da normal na horizontal

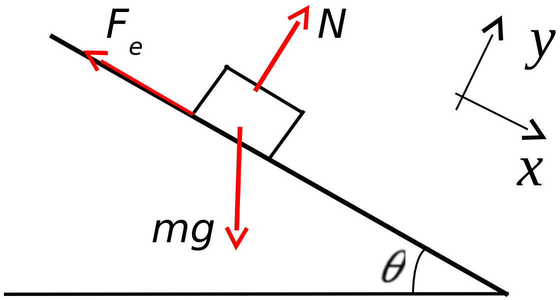
c) a componente da normal na vertical

Medida de forças de atrito: plano inclinado

Plano inclinado para aulas de física (1850)



Bloco de massa *m* na iminência de deslizar num plano inclinado:



$$P_y = mg\cos\theta = N$$
$$P_x = mg\sin\theta = F_e$$

Na iminência de deslizamento:

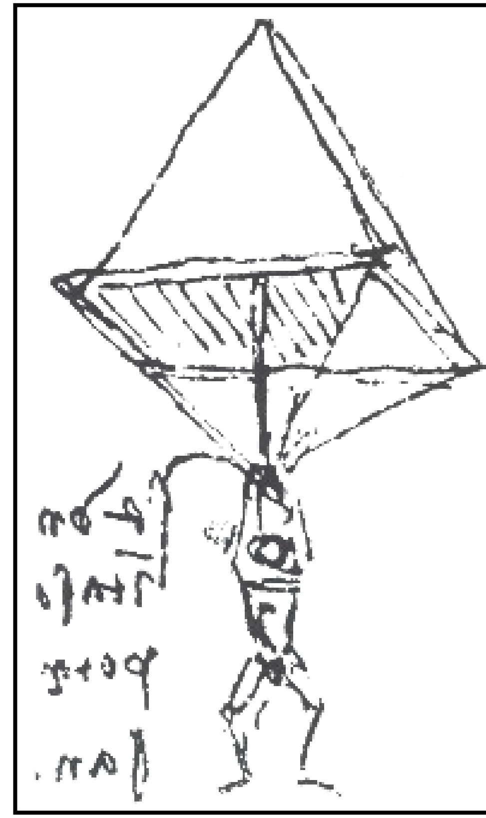
$$F_e = \mu_e N \longrightarrow \mu_e = tg\theta$$

Atrito em fluidos: Força de arraste

IFGW
Instituto de Física Gleb Wataghin

Salto realizado por Adrian Nicholas, 26/6/2000

"It took one of the greatest minds who ever lived to design it, but it took 500 years to find a man with a brain small enough to actually go and fly it."



Esboço de Leonardo da Vinci, de 1483

Modelos para Força de arraste

A força de arraste em um fluido é uma força dependente da velocidade (ao contrário da força de atrito vista até agora) e apresenta dois regimes:

a) Fluxo turbulento: velocidades altas

Força de arraste: $F_D = \frac{1}{2}\rho A C v^2$

C: coeficiente de arraste (adimensional)

A: área da seção transversal do corpo

ρ: densidade do meio

b) Fluxo viscoso: velocidades baixas

Força de arraste (esferas): $F_D = 6\pi\eta r v$

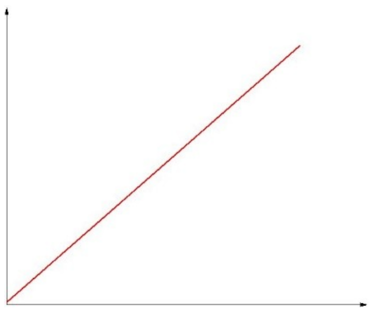
r : raio do objeto

η : viscosidade do meio ($N.s/m^2$)

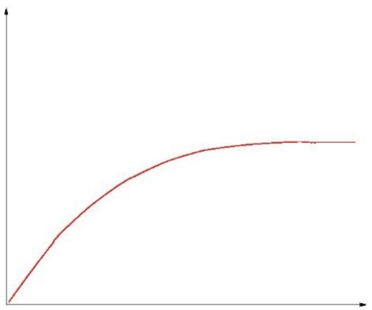
Questão 4:

Qual dos gráficos abaixo representa melhor a velocidade de uma partícula em queda livre em um fluido:

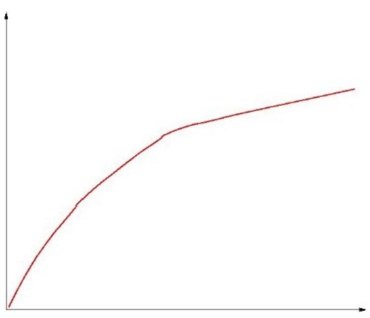
a)



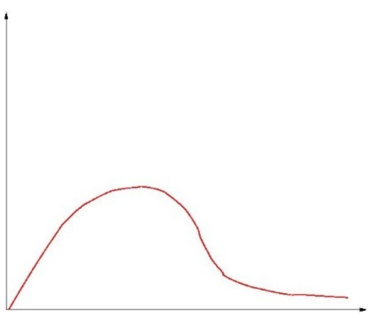
c)



b)



d)



Movimento em fluxo viscoso

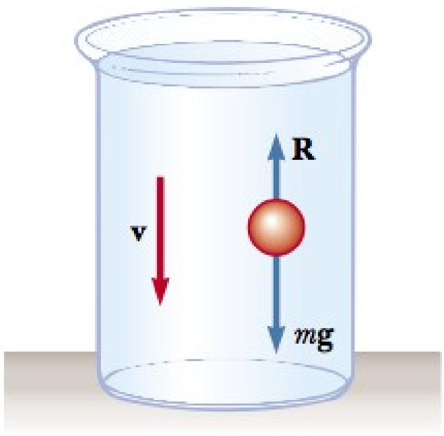
$$F_D = 6\pi\eta r v \rightarrow F_D = -bv \qquad b = 6\pi\eta r$$

Na direção vertical,

$$\sum F = ma$$

$$mg - bv = m\frac{dv}{dt}$$

$$\frac{dv}{dt} + \frac{b}{m}v = g$$



(a)

A solução desta equação é, para $v(0) = 0$:

$$\boxed{v(t) = \frac{mg}{b}\left(1 - e^{-\frac{b}{m}t}\right)}$$

Movimento em fluxo viscoso

Prova que a equação acima é solução:

$$v(t) = \frac{mg}{b}\left(1 - e^{-\frac{b}{m}t}\right) \longrightarrow \frac{d}{dt}v(t) = ge^{-\frac{b}{m}t}$$

Então:

$$\frac{dv}{dt} + \frac{b}{m}v = ge^{-\frac{b}{m}t} + \frac{b}{m}\frac{mg}{b}\left(1 - e^{-\frac{b}{m}t}\right) = g$$

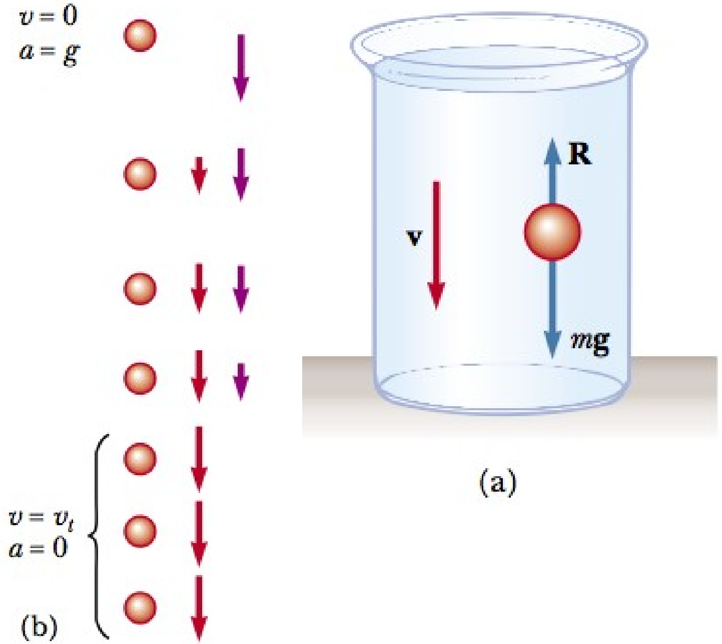
Ou seja, fica satisfeita a equação

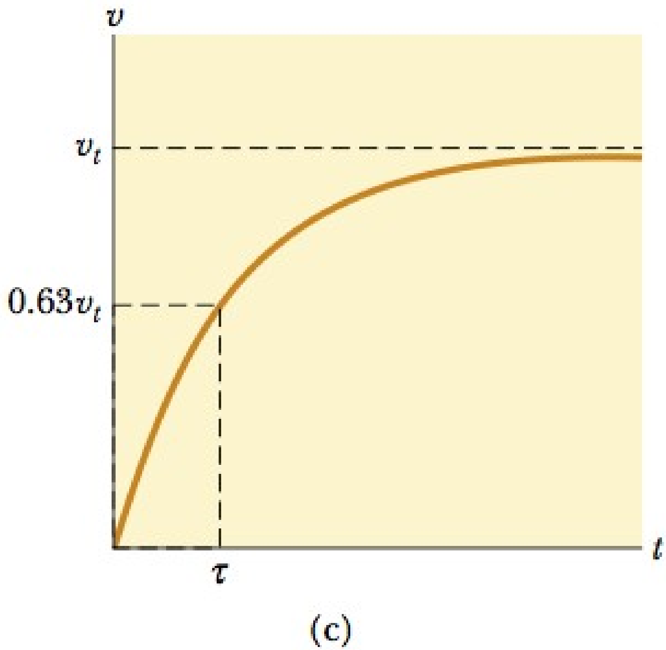
$$\frac{dv}{dt} + \frac{b}{m}v = g$$

Movimento em fluxo viscoso

Velocidade Terminal:

O aumento da força de arraste faz diminuir a aceleração da esfera; eventualmente, a esfera terá *a = 0* (velocidade constante) → velocidade terminal.





A velocidade terminal para a solução anterior é obtida quando $t \to \infty$:

$$v(t) = v_t = \frac{mg}{b} = \frac{mg}{6\pi\eta r}$$

Movimento em fluxo turbulento

Força de arraste: $F_D = \frac{1}{2}\rho A C v^2 = k v^2$

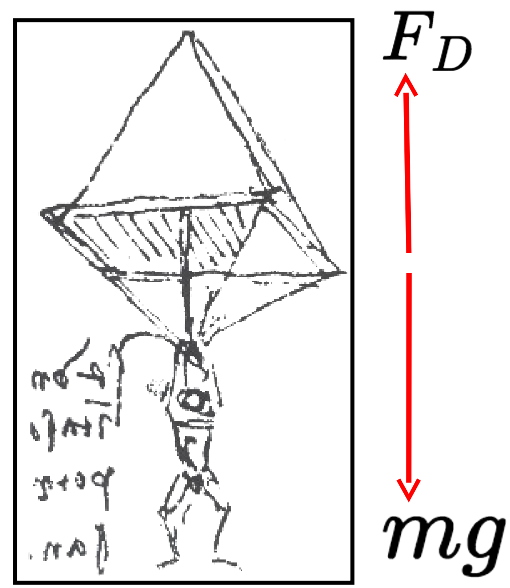
C: coeficiente de arraste (adimensional)

A: área da seção transversal do corpo

ρ: densidade do meio

$$\sum F = mg - kv^2 = m\frac{dv}{dt}$$

$$\frac{dv}{dt} + \frac{k}{m}v^2 = g$$



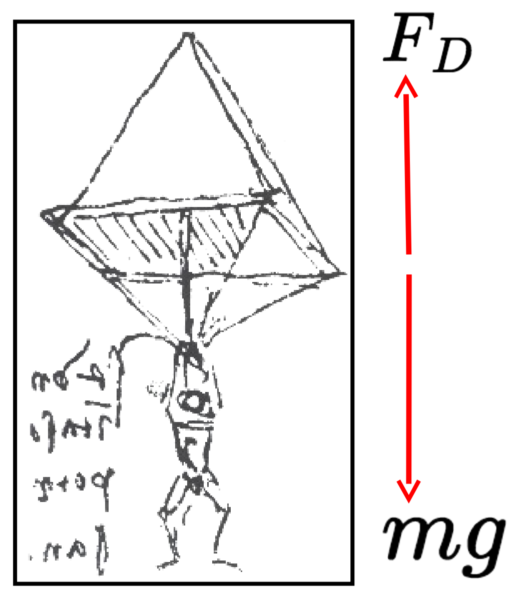
O Termo quadrático faz esta equação ser mais complicada para ser resolvida...

Movimento em fluxo turbulento

Velocidade Terminal:

$$\sum F = mg - kv^2 = m\frac{dv}{dt}$$

Podemos calcular a velocidade terminal. Quando o paraquedas atinge a velocidade terminal v_T, constante:



$$\sum F = 0 \implies F_D = mg$$

$$v_T = \sqrt{\frac{2mg}{\rho A C}}$$

Exemplo da gota de chuva (Halliday):

$v_T \sim 27$ km/h

Sem a resistência do ar,

$v_T \sim 550$ km/h

Modelos para força de arraste

Afinal de contas, qual a melhor aproximação para a força de resistência?

Velocidades baixas

Velocidades altas

$$F_D = bv + k\boxed{v^2}$$

Cada um dos termos domina em um limite de velocidade.
Em baixas velocidades a força é linear; com o aumento da velocidade, novos efeitos devidos à turbulência aparecem e a força fica proporcional ao quadrado da velocidade.

O gol que Pelé não fez

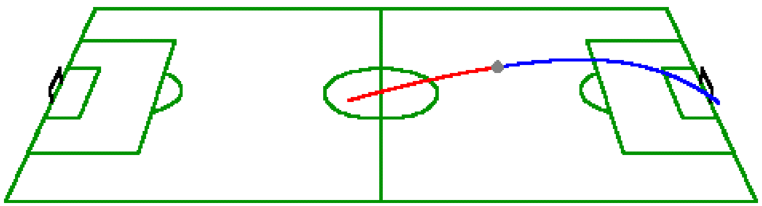
Copa de 1970, no México: Brasil x Tchecoslováquia – Pelé, no meio de campo, vê o goleiro tcheco adiantado, e arrisca um chute famoso. O desfecho da jogada foi descrito por Nelson Rodrigues:

“E, por um fio, não entra o mais fantástico gol de todas as Copas passadas, presentes e futuras. Os tchecos parados, os brasileiros parados, os mexicanos parados – viram a bola tirar o maior fino da trave. Foi um cínico e deslavado milagre não ter se consumado esse gol tão merecido. Aquele foi, sim, um momento de eternidade do futebol”.

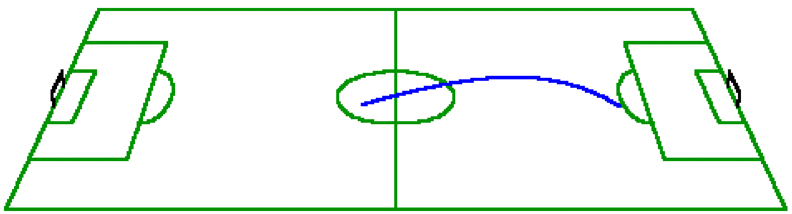
http://www.youtube.com/watch?v=cXL9Yye5FMA

http://www.cienciamao.if.usp.br/cienciasfisicas/index.php?painel=36
http://www.if.ufrj.br/~carlos/futebol.html

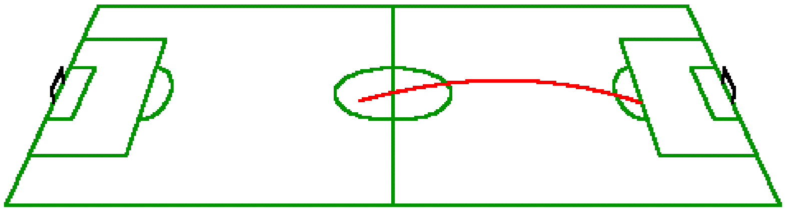
O gol que Pelé não fez



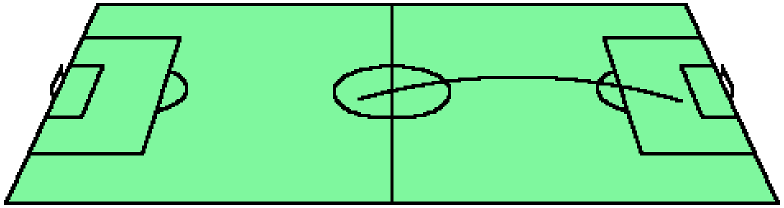
A bola partiu a 105 km/h, girando a 7 rotações por segundo. A crise do arrasto ocorreu no ponto marcado sobre a trajetória. A partir daí, a resistência do ar ficou muito menor.



Se não existisse a crise do arrasto, a bola chutada por Pelé nem conseguiria chegar à grande área.



No chute de Pelé, a força de Magnus apontava para cima, dando sustentação à bola. Se não estivesse girando, a bola mal chegaria à grande área.



Sem a influência do ar, como no vácuo, a trajetória teria a forma parabólica prevista por Galileu. E a bola cairia longe do gol! Este resultado surpreendente mostra que a aerodinâmica fez a bola de Pelé ir mais longe.