

FACFIS
Faculdade de Física

Física Básica I

6 – Algumas Aplicações das Leis de Newton

6.1. Força Centrípeta e Aplicações

- Vimos que, num movimento circular uniforme, existe uma aceleração centrípeta, dada por:

$$a = \frac{v^2}{r}$$

- Na verdade, para qualquer movimento curvilíneo plano, sempre existe uma aceleração centrípeta, que será dada pela mesma expressão acima, independentemente da maneira como a velocidade varia (se é uniforme ou não).
- Devido à 2ª Lei de Newton, associamos então a esta aceleração uma força, chamada força centrípeta:

$$F = \frac{mv^2}{r}$$

ou, sua expressão vetorial mais completa:

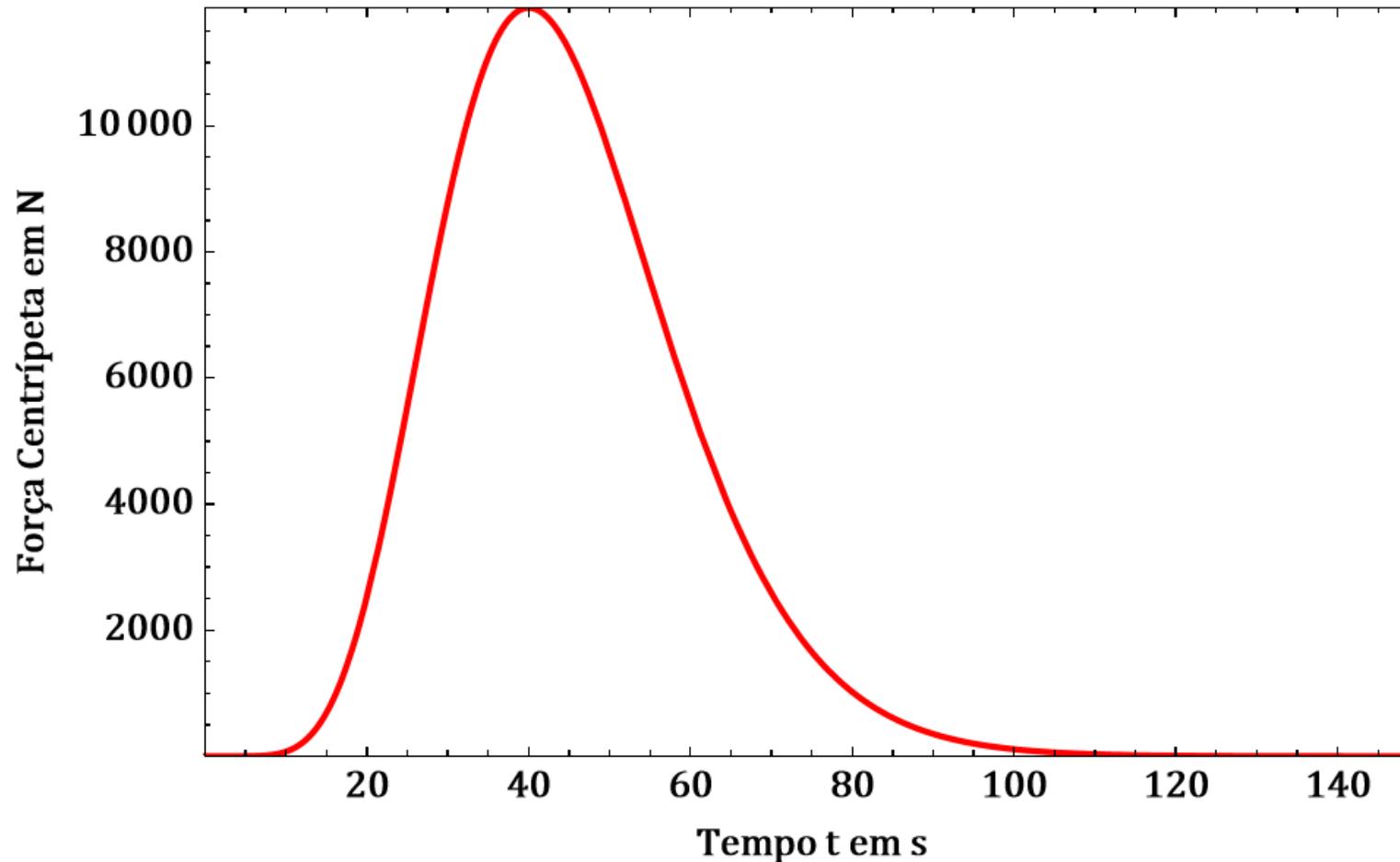
$$\vec{F} = -\frac{mv^2}{r}\hat{r}$$

Exemplos

1. Uma partícula de 10kg desenvolve um movimento circular uniforme de raio 3m com uma velocidade de 5m/s. Calcule a força centrípeta que mantém esse movimento.
2. Uma partícula de $3ng$ se move num círculo, sendo o módulo de sua velocidade em função do tempo dado por $v(t) = (3 - 6t^4)e^{-t/10}$ (sendo t e v dados no SI). (a) Calcule a força centrípeta, sabendo que o raio da trajetória é $20\mu\text{m}$. (b) Calcule a força centrípeta no instante $t = 20\text{s}$.
3. Num certo instante, a força centrípeta numa trajetória curva (não-circular) é de 600N. Sabendo que o velocímetro marca 72km/h, e o automóvel tem uma tonelada, calcule o raio de curvatura dessa curva.

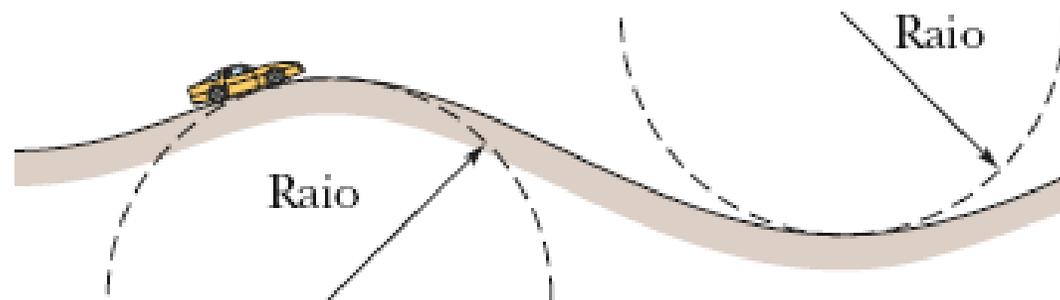
Gráfico do Exemplo 2

- A resolução do exemplo 2 anterior conduz ao gráfico abaixo, para a força em função do tempo. Note que a força depende do tempo, crescendo a partir de um valor muito baixo, mas positivo, atinge um máximo por volta de 40s após o início do movimento e depois começa a decair exponencialmente, tendendo a zero quando t tende ao infinito, mas se tornando muito fraca depois de $\approx 100s$.



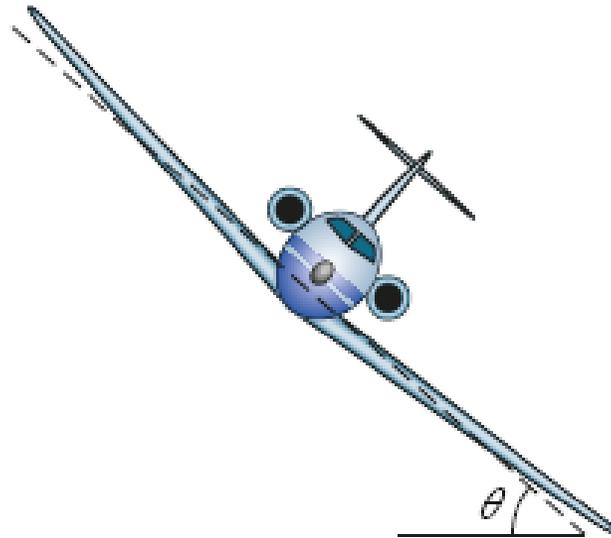
Exercício

49 M Na Fig. 6.28, um carro passa com velocidade constante por uma colina circular e por um vale circular de mesmo raio. No alto da colina, a força normal exercida sobre o motorista pelo assento do carro é zero. A massa do motorista é de 70,0 kg. Qual é o módulo da força normal exercida pelo assento sobre o motorista quando o carro passa pelo fundo do vale?



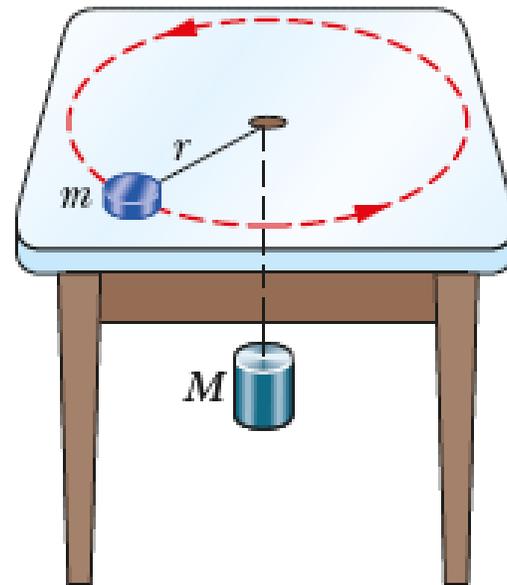
Exemplo

51 M Um avião está voando em uma circunferência horizontal a uma velocidade de 480 km/h (Fig. 6.30). Se as asas estão inclinadas de um ângulo $\theta = 40^\circ$ com a horizontal, qual é o raio da circunferência? Suponha que a força necessária para manter o avião nessa trajetória resulte inteiramente de uma “sustentação aerodinâmica” perpendicular à superfície das asas.



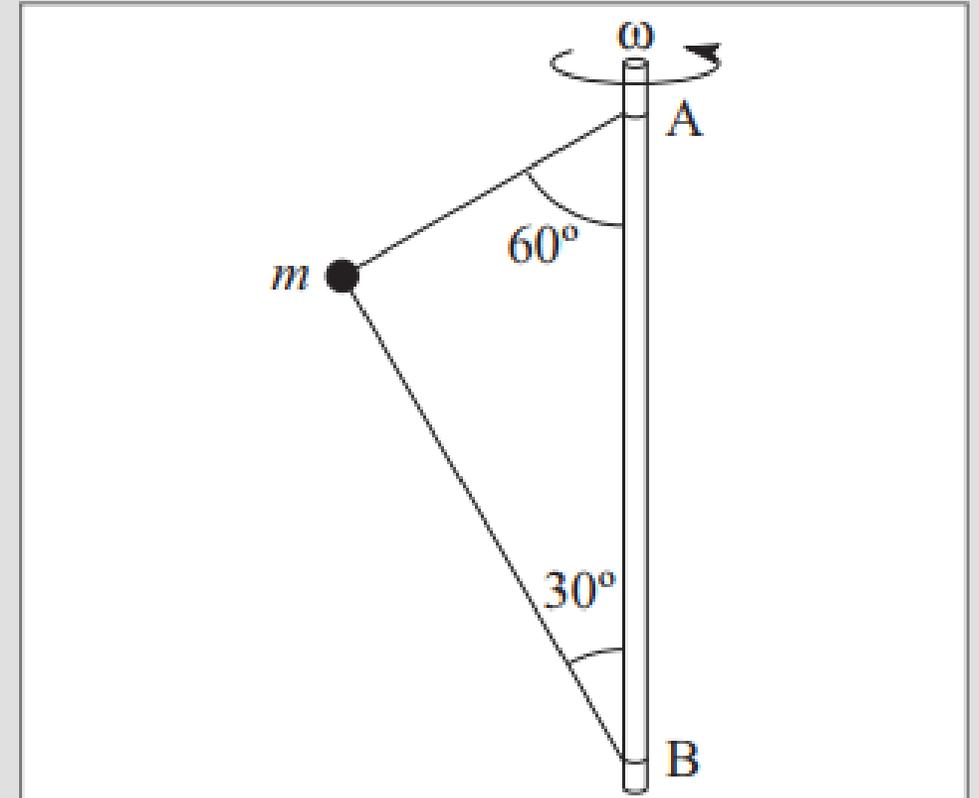
Exercício

57 M Um disco de metal, de massa $m = 1,50$ kg, descreve uma circunferência de raio $r = 20,0$ cm em uma mesa sem atrito enquanto permanece ligado a um cilindro de massa $M = 2,50$ kg pendurado por um fio que passa por um furo no centro da mesa (Fig. 6.32). Que velocidade do disco mantém o cilindro em repouso?



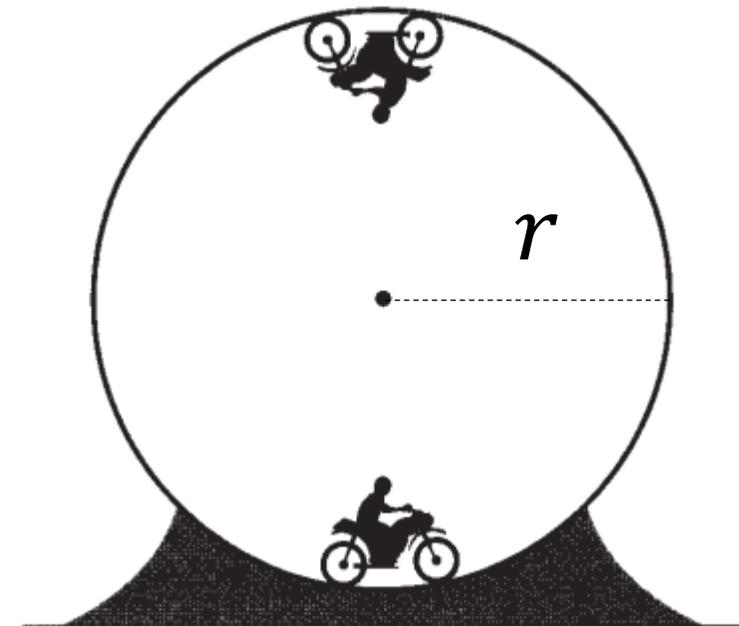
Exemplo

5.19 No sistema da Figura, a bolinha de massa m está amarrada por fios de massa desprezível ao eixo vertical AB e gira com velocidade angular ω em torno desse eixo. A distância AB vale l . Calcule as tensões nos fios superior e inferior. Para que valor de ω o fio inferior ficaria frouxo?



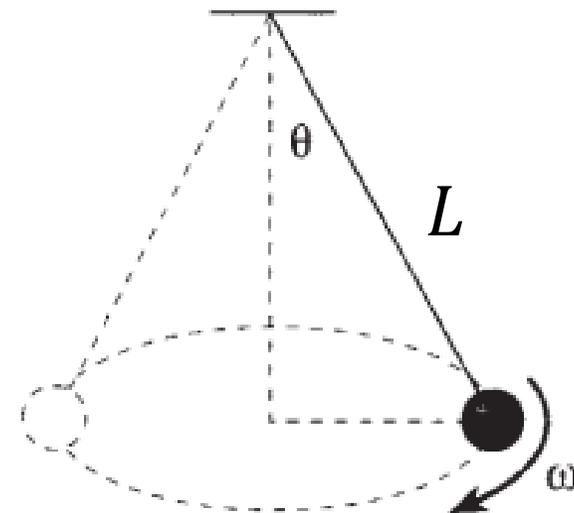
Exemplo: Globo da Morte

- O “globo da morte” está representado ao lado. Nele, um(a) motociclista tem faz movimentos circulares dentro de uma esfera.
- Considerando que a esfera tem raio r , qual deve ser a velocidade mínima v para que a pessoa consiga fazer um movimento circular como representado na figura ao lado, abaixo, sem perder contato com a superfície no ponto mais alto?



Exemplo: Pêndulo Cônico

- O brinquedo ao lado é um exemplo de pêndulo cônico, pois tem formato de cone e é um movimento periódico.
- Para o problema simplificado de uma partícula de massa m nesse movimento, representado abaixo, à direita, determine, em função de g , m , θ e L :
 - a) A tração na corda.
 - b) A velocidade da partícula.
 - c) O período do movimento.



Exercício : Inclinação de uma pista curva

- Outro efeito da força centrípeta é que é mais fácil fazer uma curva numa estrada se a pista for inclinada em relação à horizontal.
- Podemos modelar a situação como um movimento circular em relação a um certo raio de curvatura, como no esquema abaixo:

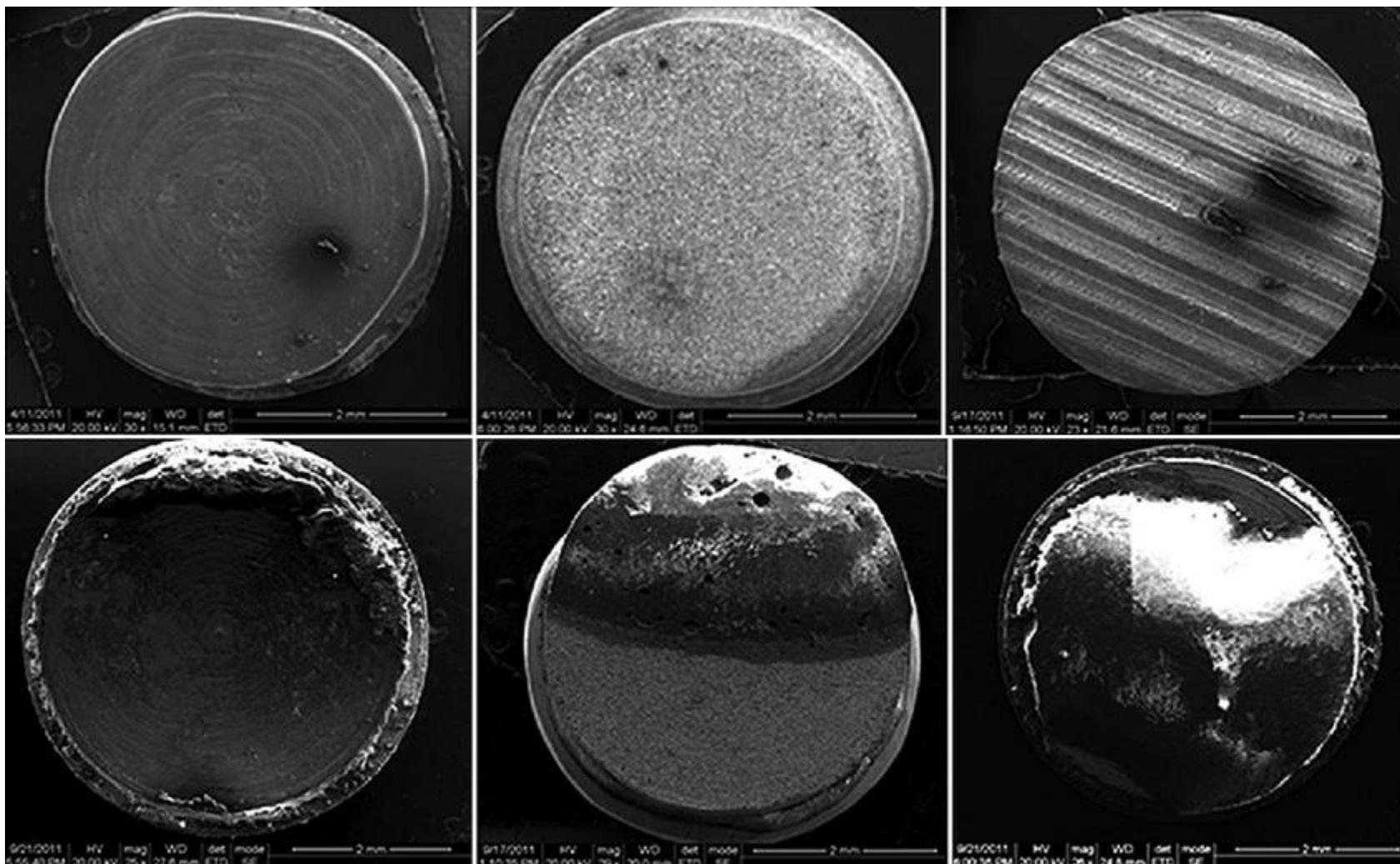


- Para a situação simplificada abaixo, considere que a velocidade média com que os carros passam nessa curva tem um valor v conhecido. Suponha também que o raio de curvatura é conhecido, pois pode ser obtido pelo formato da curva, aproximadamente circular.
 - Daí, podemos nos perguntar qual deveria ser a elevação da pista, dada pelo ângulo α da figura, que permite os carros descreverem essa curva, desprezando o atrito.
- a) Determine o módulo da força normal a que o carro está submetido.
 - b) Determine a força centrípeta.
 - c) Mostre que a tangente desse ângulo deve ser $\text{tg } \alpha = v^2 / Rg$.



6.2. Força de Atrito Estático e Cinético

- Nos exemplos que passaram, desprezamos um efeito importante, chamado atrito.
- Todos os objetos que entram em contato físico direto experimentam o atrito, que é uma força contrária ao movimento ou à tendência de movimento.
- Ele se deve ao fato de que nenhuma superfície é completamente lisa, portanto o contato físico entre duas superfícies provoca interações e colisões que dissipam energia e momento.
- Essas dissipações são modeladas pela força de atrito.

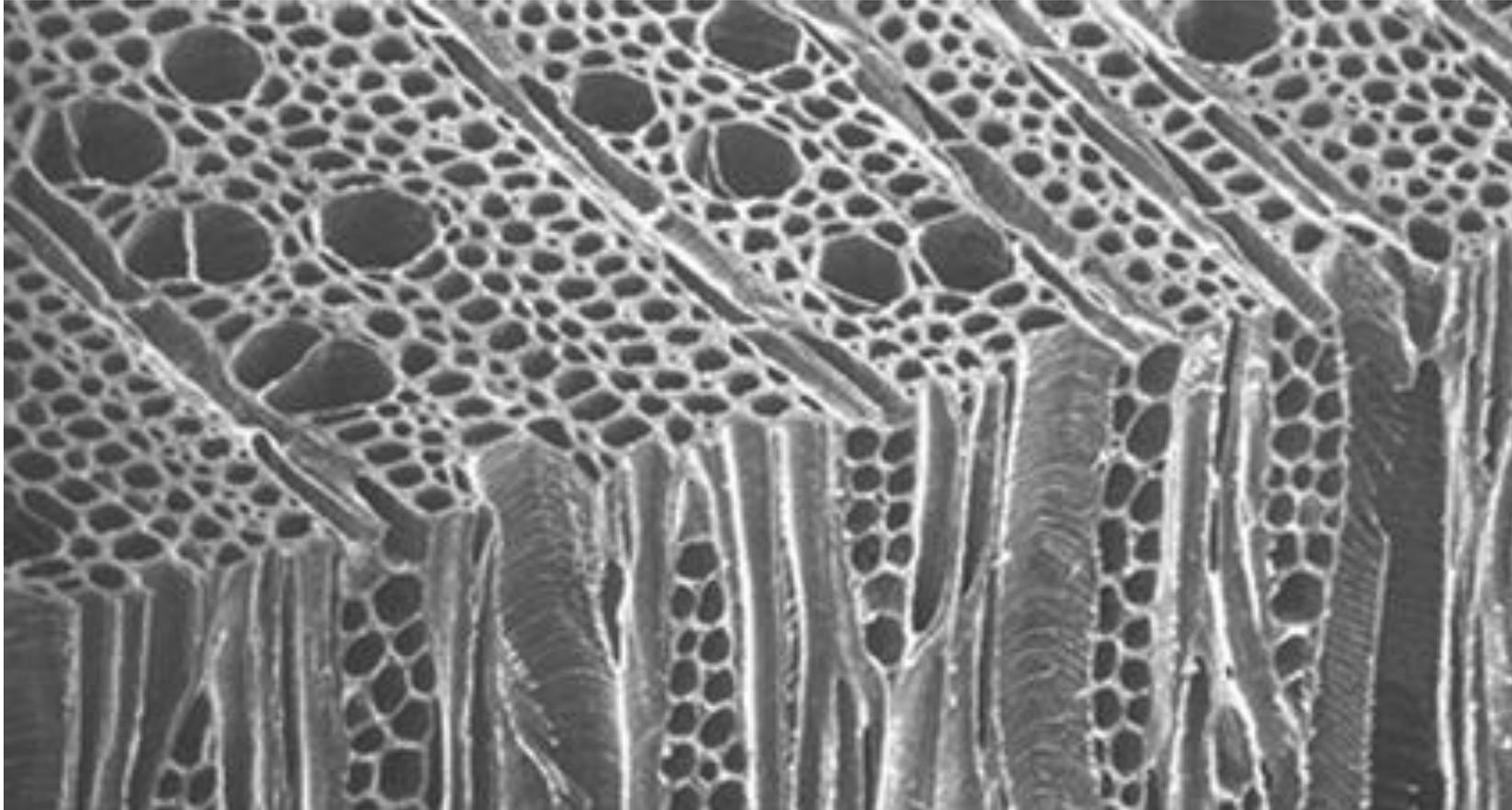


Detalhes da superfície de fratura de um material cerâmico usado por dentistas, usando microscópio eletrônico.

Fonte: Indian Journal of Dental Research, K. Deepak et al. 2013.

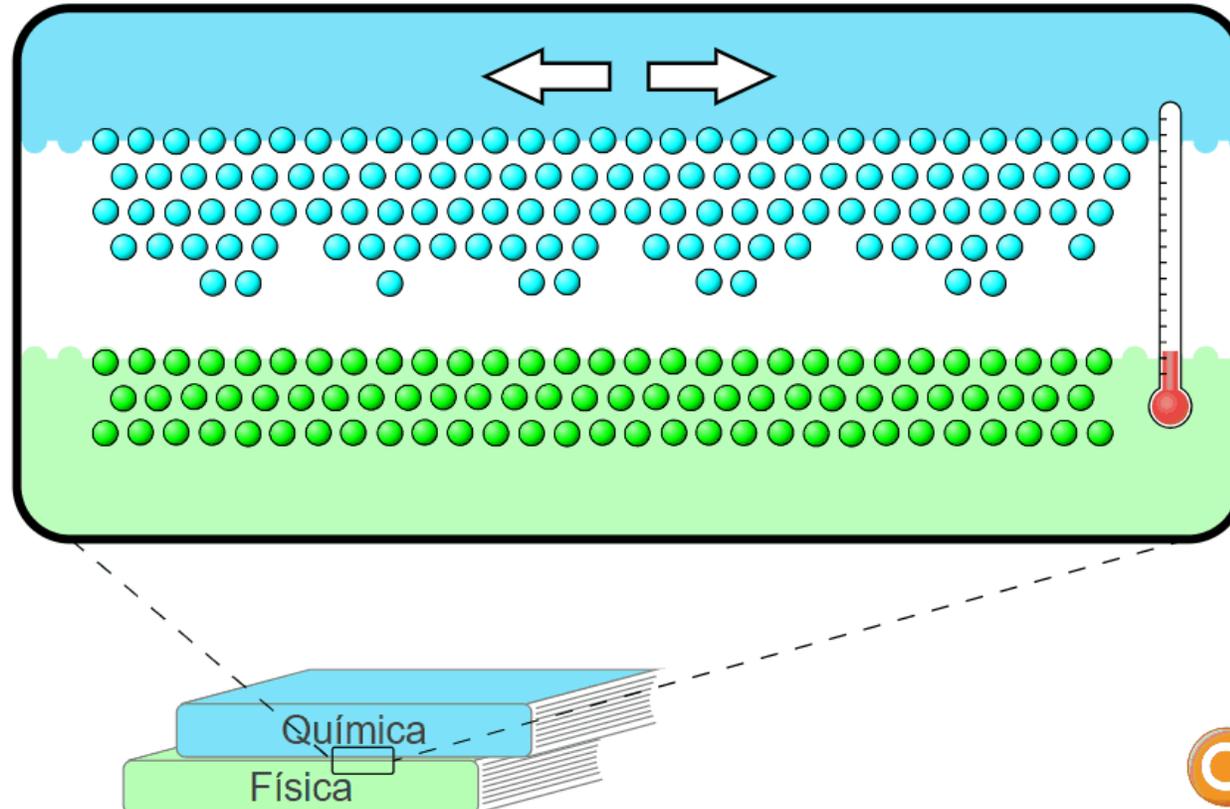
Superfície de madeira vista num microscópio eletrônico.

Fonte: E. Csanády et al. *Quality of Machined Wood Surfaces*, Springer, 2015.



Dissipação de Energia por Atrito

- A animação abaixo ilustra o fato de que o atrito provoca a dissipação de energia.
- https://phet.colorado.edu/sims/html/friction/latest/friction_all.html?locale=pt_BR
- Essa energia é dissipada na forma de calor, o que provoca aquecimento das superfícies de contato.



Dissipação de Energia por Atrito

- Esse efeito pode ser verificado em inúmeras situações:
- Atritar as mãos para se aquecer no frio.
- O aquecimento dos freios devido ao atrito durante o freio.



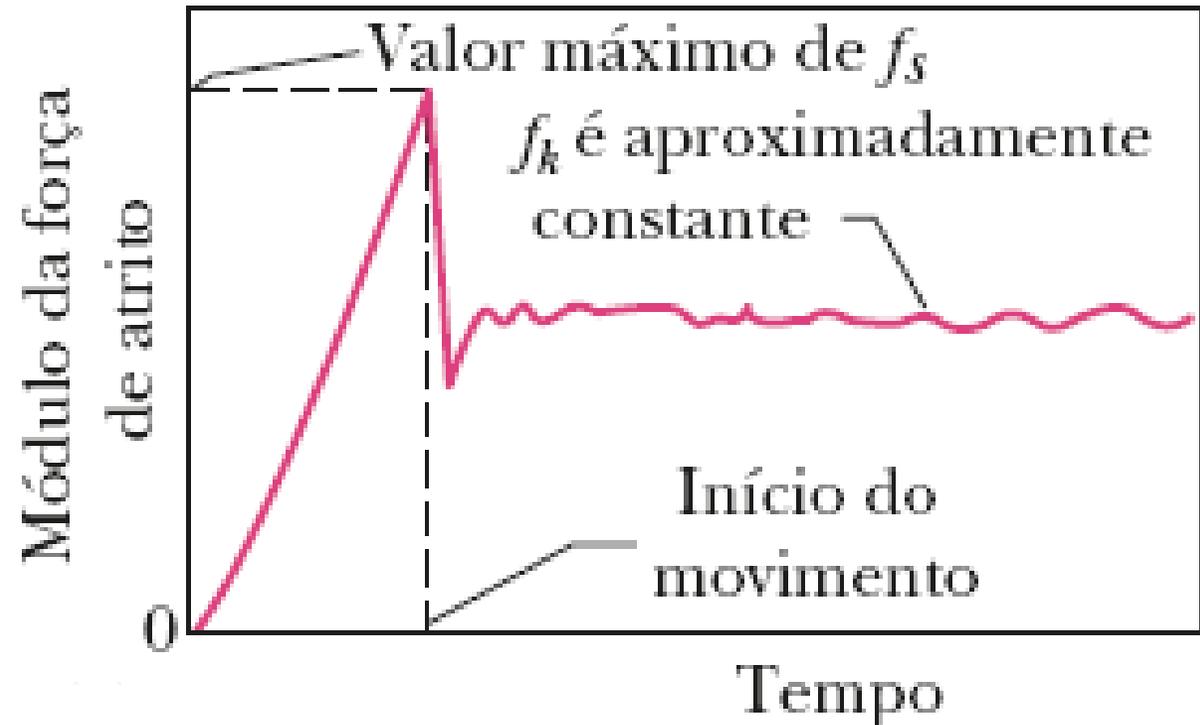
Dissipação de Energia por Atrito

- A desintegração de meteoros ao atritar com a atmosfera em grande velocidade: o atrito os superaquece, derrete e desintegra.*
- A descoberta da produção de fogo pela humanidade: atritando pedaços de madeira
- Outras pesquisas indicam que ar se acumula no interior do meteoro aumentando a pressão interna e fazendo ele explodir, o que facilita sua desintegração. Fonte: [Air penetration enhances fragmentation of entering meteoroids - Tabetah - 2018 - Meteoritics & Planetary Science - Wiley Online Library](#)



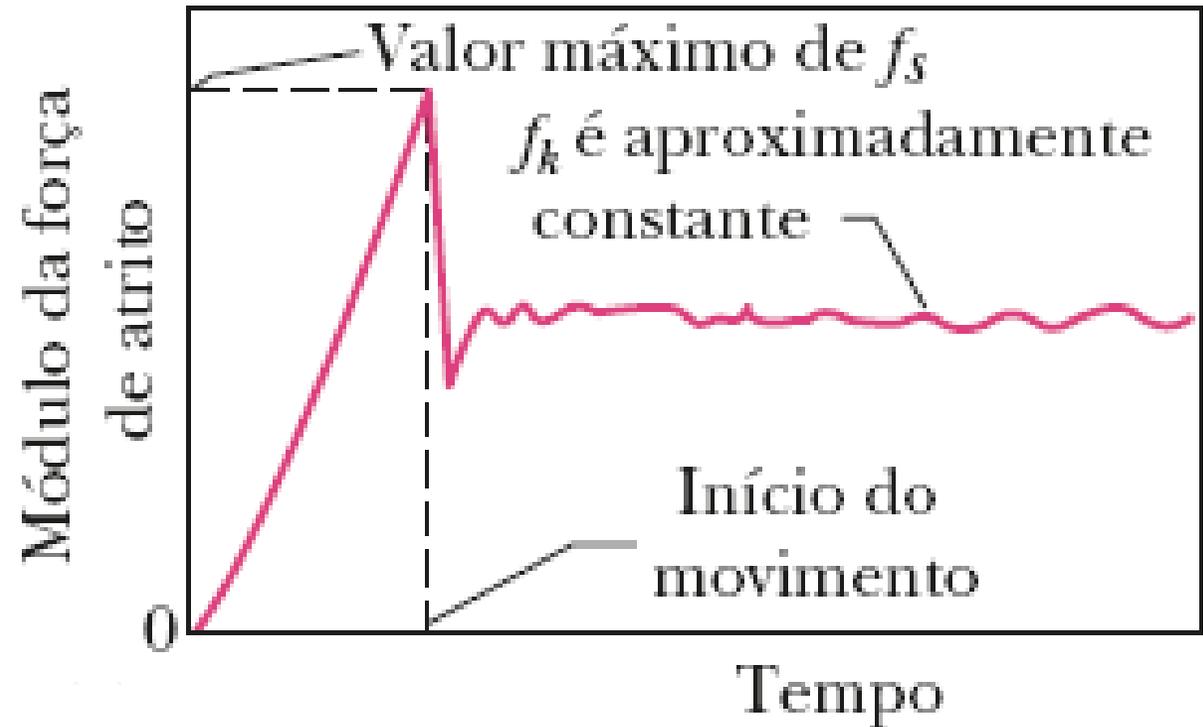
Atrito Estático e Atrito Cinético

- Vamos considerar uma situação em que queremos mover um bloco, tirando-o do repouso, e vamos considerar o atrito.
- Vamos aplicar uma força, que vai aumentando lentamente, de forma a medirmos o atrito que surge.
- À medida que a força aplicada aumenta, o atrito vai aumentando de forma a compensar a força aplicada.



Atrito Estático e Atrito Cinético

- Até que chega um momento em que a força aplicada vence o atrito.
- Verifica-se então um comportamento semelhante ao da figura, experimentalmente.
- O atrito durante a fase de repouso é chamado **atrito estático** f_s .
- Na fase de movimento, é chamado **atrito cinético** f_k .



Expressões Matemáticas das Forças de Atrito

- **Direção:** As forças de atrito são componentes superficiais. Por isso sempre apontam na direção de contato entre as superfícies.
- **Sentido:** A força de atrito cinético é contrária ao movimento, a de atrito estático é contrária à tendência de movimento.
- O módulo dependerá do atrito ser estático ou cinético:

Expressões Matemáticas das Forças de Atrito

- **Módulo:**

1. A força de atrito cinético é dada por

$$f_k = \mu_k N$$

2. A força de atrito estático máxima é dada por

$$f_{s,max} = \mu_s N$$

- Onde μ_k e μ_s são, respectivamente, os **coeficientes de atrito cinético e estático** e N é a força normal à superfície de contato que está provocando o atrito.

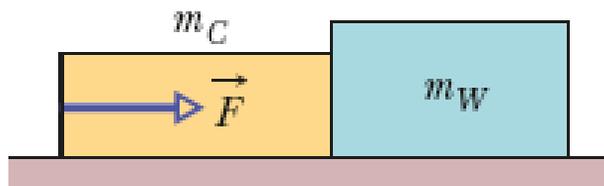
Exemplos

3 F Uma cômoda com uma massa de 45 kg, incluindo as gavetas e as roupas, está em repouso no piso. (a) Se o coeficiente de atrito estático entre a cômoda e o piso é 0,45, qual é o módulo da menor força horizontal necessária para fazer a cômoda entrar em movimento? (b) Se as gavetas e as roupas, com uma massa total de 17 kg, são removidas antes de empurrar a cômoda, qual é o novo módulo mínimo?

7 F Uma pessoa empurra horizontalmente um caixote de 55 kg com uma força de 220 N para deslocá-lo em um piso plano. O coeficiente de atrito cinético é 0,35. (a) Qual é o módulo da força de atrito? (b) Qual é o módulo da aceleração do caixote?

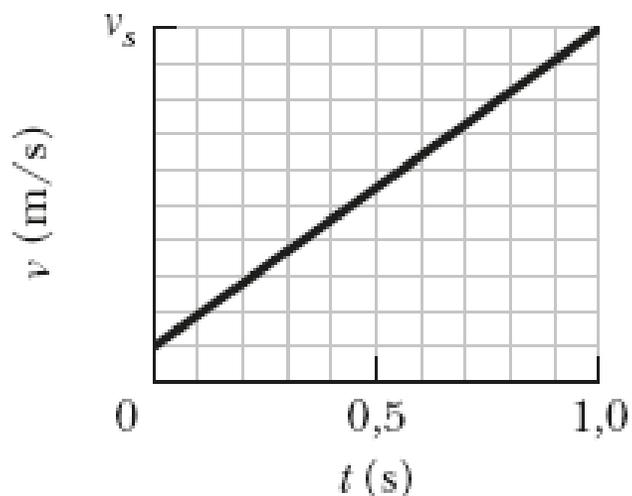
Exercícios

20 M Na Fig. 6.16, uma caixa de cereais Cheerios (massa $m_C = 1,0$ kg) e uma caixa de cereais Wheaties (massa $m_W = 3,0$ kg) são aceleradas em uma superfície horizontal por uma força horizontal \vec{F} aplicada à caixa de cereais Cheerios. O módulo da força de atrito que age sobre a caixa de Cheerios é $2,0$ N e o módulo da força de atrito que age sobre a caixa de Wheaties é $4,0$ N. Se o módulo de \vec{F} é 12 N, qual é o módulo da força que a caixa de Cheerios exerce sobre a caixa de Wheaties?



Exercícios

24 M Um bloco de 4,10 kg é empurrado em um piso por uma força horizontal constante de módulo 40,0 N. A Fig. 6.19 mostra a velocidade v do bloco em função do tempo t quando o bloco se desloca ao longo do piso. A escala vertical do gráfico é definida por $v_s = 5,0$ m/s. Qual é o coeficiente de atrito cinético entre o bloco e o piso?



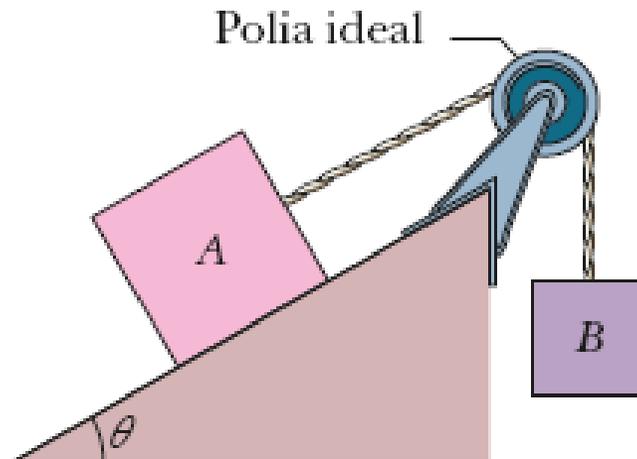
Exemplo

- Considere um plano inclinado com atrito.
- Determine a condição de equilíbrio.
- Se a partícula acelera para baixo, determine a aceleração dela.



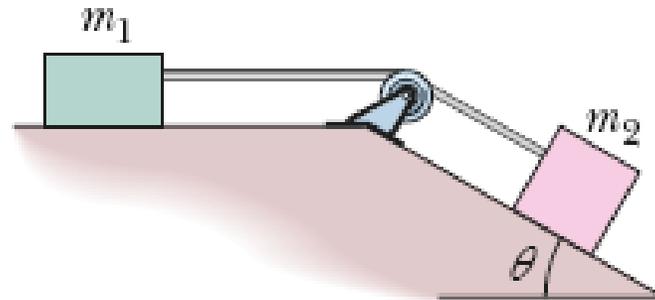
Exemplo

27 M Na Fig. 6.22, dois blocos estão ligados por uma corda que passa por uma polia. O bloco A pesa 102 N e o bloco B pesa 32 N. Os coeficientes de atrito entre A e a rampa são $\mu_s = 0,56$ e $\mu_k = 0,25$. O ângulo θ é igual a 40° . Suponha que o eixo x é paralelo à rampa, com o sentido positivo para cima. Na notação dos vetores unitários, qual é a aceleração de A , se A está inicialmente (a) em repouso, (b) subindo a rampa e (c) descendo a rampa?



Exercício

66 Na Fig. 6.39, o bloco 1, de massa $m_1 = 2,0$ kg, e o bloco 2, de massa $m_2 = 3,0$ kg, estão ligados por um fio, de massa desprezível, e são inicialmente mantidos em repouso. O bloco 2 está em uma superfície sem atrito com uma inclinação $\theta = 30^\circ$. O coeficiente de atrito cinético entre o bloco 1 e a superfície horizontal é 0,25. A polia tem massa e atrito desprezíveis. Ao serem liberados, os blocos entram em movimento. Qual é a tração do fio?



6.3. Modelagem Matemática da Força de Arrasto. Velocidade Terminal

- Estudamos o atrito entre duas superfícies, que é proporcional à força normal.
- Quando há contato entre um corpo e um fluido, o atrito é chamado **arrasto**.
- Verifica-se experimentalmente que uma boa primeira aproximação para modelar a força de arrasto \vec{D} é com ela sendo proporcional ao quadrado da velocidade:

$$D = \frac{1}{2} C \rho A v^2 ,$$

- sendo C uma constante empírica, ρ é a densidade do fluido (kg/m^3), \vec{v} é a velocidade relativa do fluido (m/s), A é a área (m^2) da seção reta perpendicular a \vec{v} .

Questões e Interpretação da Equação

- Use as unidades SI das grandezas anteriores para verificar que a constante C deve ser adimensional.
- O arrasto é proporcional à densidade: quanto mais denso o fluido (mais “pesado”), mais arrasto, quanto menos denso o fluido (mais “leve”), menos arrasto.
- O arrasto é proporcional a v^2 : ele aumenta muito com a velocidade, não é proporcional a v , cresce mais rápido do que uma proporção. Se a velocidade dobra, o arrasto quadruplica.
- O arrasto é proporcional à área perpendicular à direção da velocidade. Pense a respeito e use essa ideia para explicar o modo como uma folha cai.

Exemplo

39 M Calcule a razão entre a força de arrasto experimentada por um avião a jato voando a 1.000 km/h a uma altitude de 10 km e a força de arrasto experimentada por um avião a hélice voando a metade da altitude com metade da velocidade. A massa específica do ar é $0,38 \text{ kg/m}^3$ a 10 km e $0,67 \text{ kg/m}^3$ a 5,0 km. Suponha que os aviões possuem a mesma área de seção reta efetiva e o mesmo coeficiente de arrasto C .

Velocidade terminal

- Resolvendo a equação diferencial do problema anterior, verificamos que a velocidade tende a um valor constante quando $t \rightarrow \infty$.
- Podemos determinar esse valor facilmente, observando que a segunda lei de Newton para o eixo y (orientado para baixo), numa queda vertical com força de arrasto do ar, por exemplo:

$$mg - D = ma$$

- Se a velocidade tende a um valor constante, a aceleração tende a zero. Então, nesse limite, $mg - D = 0$, o que leva a $mg = D$. Isolando a velocidade, esta será a própria velocidade terminal v_t , ou seja:

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

A Tabela 6.2.1 mostra os valores de v_t para alguns objetos comuns.

Tabela 6.2.1 Algumas Velocidades Terminais no Ar

Objeto	Velocidade terminal (m/s)	Distância para 95% ^a (m)
Peso (do arremesso de peso)	145	2.500
Paraquedista em queda livre (típico)	60	430
Bola de beisebol	42	210
Bola de tênis	31	115
Bola de basquete	20	47
Bola de pingue-pongue	9	10
Gota de chuva (raio = 1,5 mm)	7	6
Paraquedista (típico)	5	3

^aDistância de queda necessária para atingir 95% da velocidade terminal.

Fonte: Adaptada de Peter J. Brancazio, *Sport Science*, 1984, Simon & Schuster, New York.

Exemplo

36 F A velocidade terminal de um paraquedista é 160 km/h na posição de águia e 310 km/h na posição de mergulho de cabeça. Supondo que o coeficiente de arrasto C do paraquedista não muda de uma posição para outra, determine a razão entre a área da seção reta efetiva A na posição de menor velocidade e a área na posição de maior velocidade.