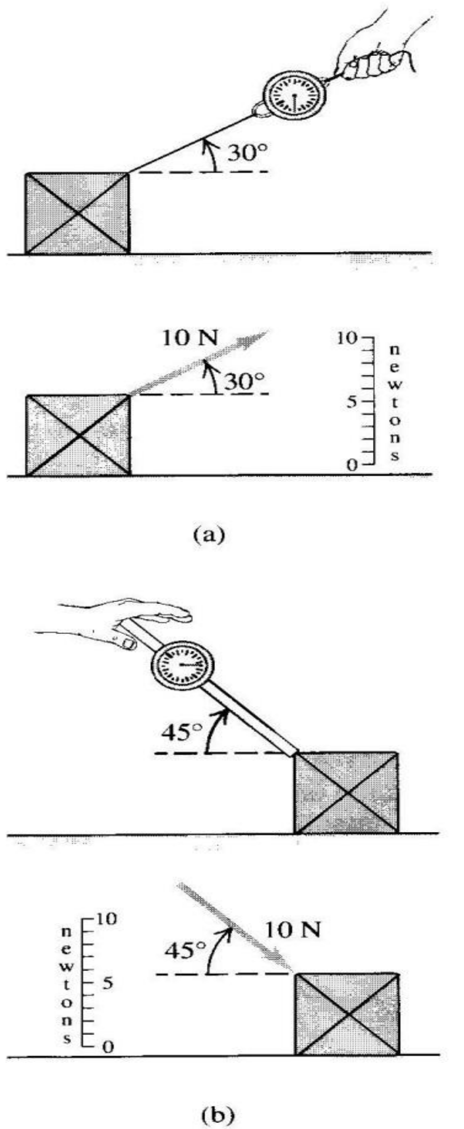
FORÇA e INTERAÇÕES



IGURA 4.1 A força exercida sobre ma caixa pode (a) puxá-la ou (b) mpurrá-la. Um diagrama da força lustra cada caso.

Forças de contacto – Quando uma força envolve o contacto direto entre dois corpos

Forças de longo alcance – Acuam mesmo quando os corpos não estão em contacto, como por exemplo as forças do campo gravitacional ou de um campo magnético

As forças de contacto podem ainda ser classificadas em **forças aplicadas** no sistema e em forças de restrição ao movimento do sistema, denominadas **forças de ligação (ou reações)**.

A unidade de força do SI é o **Newton**

A unidade de força do Sistema CGS é o **Dine** ou Dina (Brasil)

$$[F] = LMT^{-2}$$

$$1N = 1mkgs^{-2} = \frac{100cm}{1m} \times \frac{1000g}{1kg} \times \left(\frac{1s}{1s}\right)^{-2} \Rightarrow \boxed{1N = 10^5\ dines}$$

Existe ainda uma unidade muito comum, que é o quilograma-força (kgf).

$\boxed{\text{1kgf=9.8 N}}$ ***- que é a força com que a terra atrai a massa de 1 kg***

LEIS DE NEWTON

1ª Lei de Newton

Quando é nula a resultante das forças que atuam sobre um ponto material, ele move-se com velocidade constante (ou nula).
Enunciado alternativo: **Não se altera o estado de repouso ou movimento de um ponto material quando a resultante das forças que atuam é nula**

Quando se trata de um corpo rígido esta lei refere-se apenas ao movimento de translação do corpo que pode ser representado por um ponto, centro de massa, no qual se considera concentrada toda a massa do corpo.

Nesta 1ª parte da dinâmica utiliza-se designação "corpo" por facilidade de exposição, mas o seu significado é o de uma partícula onde está concentrada a massa do corpo

2ª Lei de Newton

Quando uma força resultante das forças externas atua sobre um corpo, o corpo acelera. O vetor aceleração possui o mesmo sentido e a mesma direção do vetor força resultante. O seu módulo é diretamente proporcional ao módulo da força aplicada e inversamente proporcional à massa do corpo.

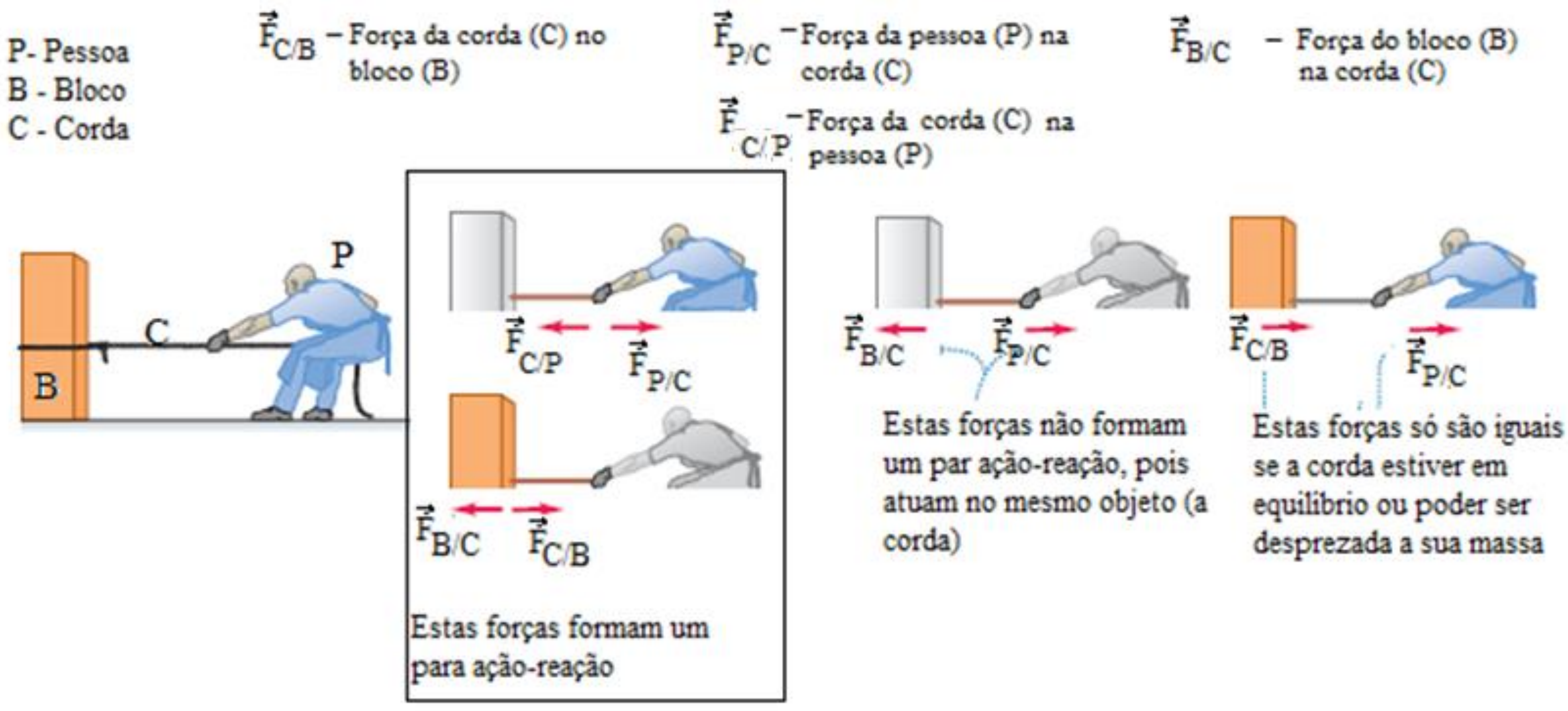
$$\boxed{\vec{F} = m\,\vec{a}}$$

$\vec{a}$ - é o vetor aceleração e *m* é a massa do corpo.

Se a força $\vec{F}$ for constante, o movimento é retilíneo uniformemente acelerado

3ª Lei de Newton

Quando um corpo A exerce uma força sobre um corpo B (**uma ação**), então o corpo B exerce uma força sobre o corpo A (**reação**) . Essas duas forças têm o mesmo módulo e a mesma direção, mas possuem sentidos contrários. **Essas duas forças *atuam em corpos diferentes***



Consequências da 1ª Lei.

1. ESTÁTICA

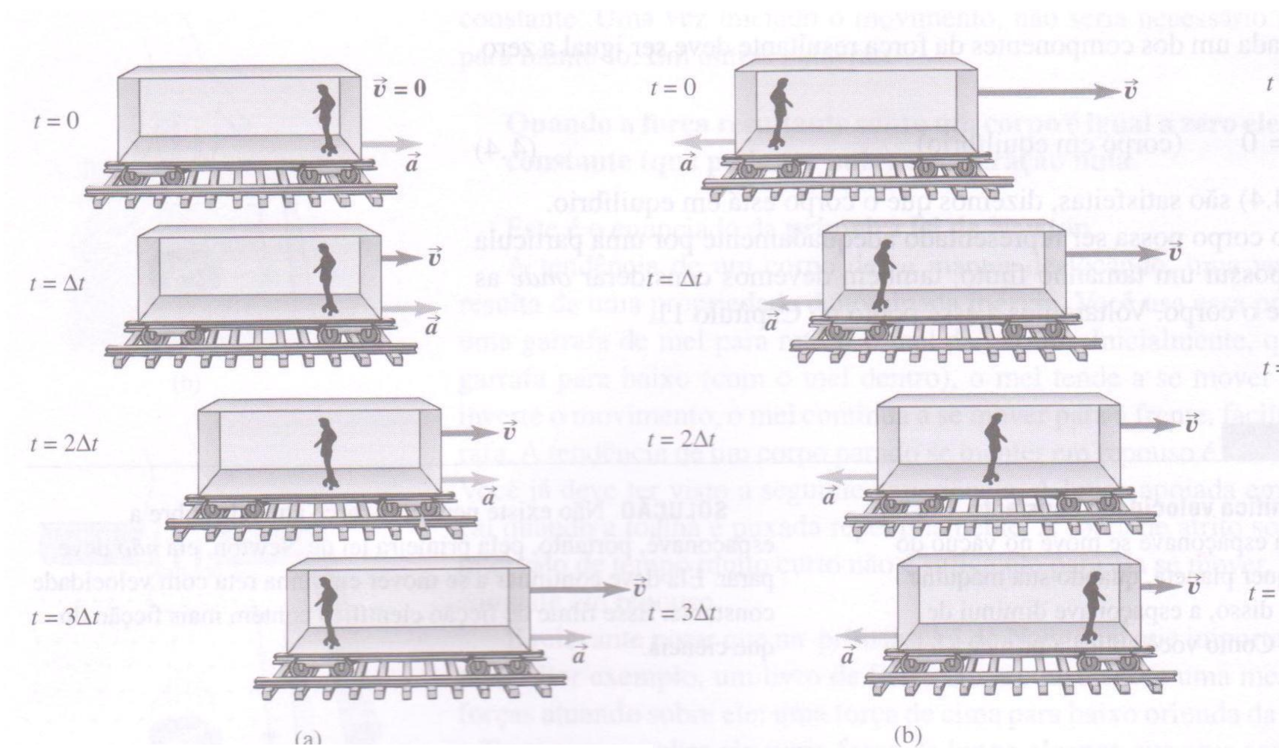
Em resultado da 1ª Lei pode afirmar-se que, para um ponto material inicialmente em repouso , **a condição necessária e suficiente de equilíbrio é o anulamento das forças que sobre ele atuam.**

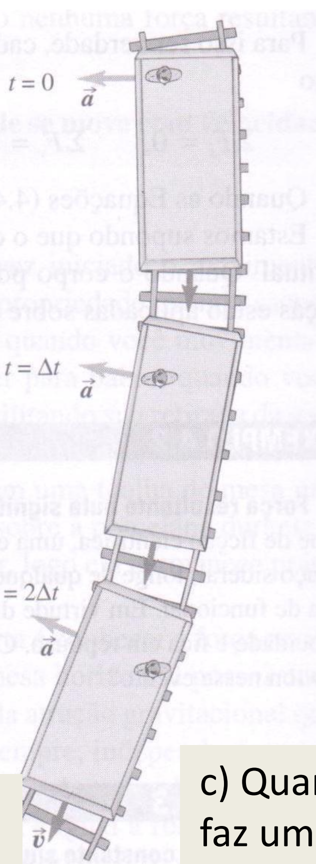
No caso dos sistemas materiais, em particular nos corpos rígidos, aquela condição é necessária mas não suficiente, uma vez que é fácil verificar que duas forças iguais, mas de sentido contrário, provocam um MOVIMENTO DE ROTAÇÃO se não estiverem na mesma linha de ação, embora tenham resultante nula.

Neste caso, **a condição de equilíbrio exige o anulamento das forças e o anulamento do seu momento em relação ao centro de rotação**, como se verá mais tarde no estudo do equilíbrio de um corpo rígido

2. SISTEMAS DE REFERÊNCIA INERCIAL

Um sistema de referência para o qual seja válida a 1ª lei de Newton chama-se SISTEMAS DE REFERÊNCIA INERCIAL





Viajando num veículo em aceleração

a) Estando inicialmente em repouso o passageiro tenderá a permanecer em repouso em relação a um sistema inercial quando o veículo acelera;

b) se o passageiro e o veículo estão inicialmente em movimento, o passageiro tenderá a manter o movimento em relação a um sistema inercial quando o veículo desacelera

c) Quando o veículo faz uma curva o passageiro tende a andar em linha reta em relação a um sistema inercial

No exemplo anterior, um sistema de referência ligado à carruagem do comboio, que se desloca com aceleração *a*, **não é INERCIAL**, porque em relação a este sistema de referência, não se verifica a 1ª lei de Newton. A resultante das forças que atuam sobre o passageiro é nula e o seu movimento em relação a este sistema tem uma aceleração *-a.*

A $\vec{F}_{in} = -m\vec{a}$

denomina-se força de inércia.

Esta é a força que seria necessária aplicar ao corpo para tornar válida a 1ªlei de Newton e o sistema ligado ao comboio poder ser considerado inercial.

Para a grande maioria das aplicações pode considerar-se como inercial qualquer sistema ligado à superfície terrestre.

No caso do comboio o sistema poderia ser considerado inercial se o comboio se movesse em linha reta com velocidade constante.

Em conclusão, para a maior parte das aplicações, pode ser considerado como inercial qualquer sistema que se mova com o vetor velocidade constante em relação à terra.

Outro exemplo clássico refere-se a um passageiro que se desloca num elevador em cima de uma balança de mola. Como o sistema não é inercial porque o elevador tem uma determinada aceleração, a balança irá medir não o peso $p = mg$

Mas sim o **peso aparente (p_a)**

$p_a = m \times g - m \times a$ (considera-se positiva a aceleração no movimento descendente)

Este peso pode ser menor ou maior que o peso real dependendo do sinal e do valor da aceleração (a), podendo mesmo ser nulo quando a aceleração do elevador em sentido descendente for igual à aceleração da gravidade.

Consequências da 2ª Lei.

PESO de um corpo

O peso de um corpo traduz a força de atração gravitacional exercida pela terra sobre o corpo. Pode ser calculado através da 2ª lei de Newton $\vec{F} = m\,\vec{a}$ em que a aceleração é conhecida (aceleração da gravidade, g) $\vec{P} = m\,\vec{g}$

A LEI DA ATRAÇÃO UNIVERSAL refere que a força gravitacional *F* resultante da interação de dois corpos com massas m_1 e m_2 colocados a uma distância *d*, tem a direção da linha que une os dois corpos, e a sua intensidade F pode ser escrita na forma:

$$F = G\frac{m_1\, m_2}{d^2}$$

Em que G é a constante gravitacional universal

$G = 6,67 \times 10^{-11} \mathrm{Nm}^2/\mathrm{kg}^2$

Considerando a massa do corpo *m* , a massa da terra *M* e o raio da terra *r*, será:

$$P = G\frac{m\,M}{r^2} \Rightarrow mg = G\frac{m\,M}{r^2} \Rightarrow \boxed{g = G\frac{M}{r^2} \approx 9{,}8\; m\; s^{-2}}$$

O peso tem a direção da vertical ao lugar, está dirigido de cima para baixo e a sua intensidade pode ser calculada por $\boxed{P = m\,g}$

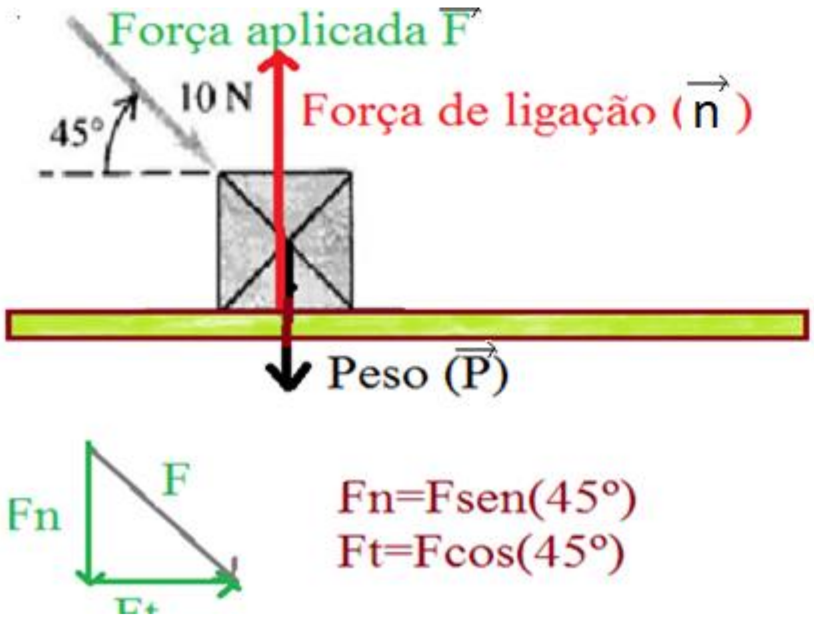
Nota: Nesta aproximação considera-se um sistema ligado à terra como um sistema inercial., desprezando-se a aceleração centrípeta devida ao movimento de rotação e ao movimento de translação da terra

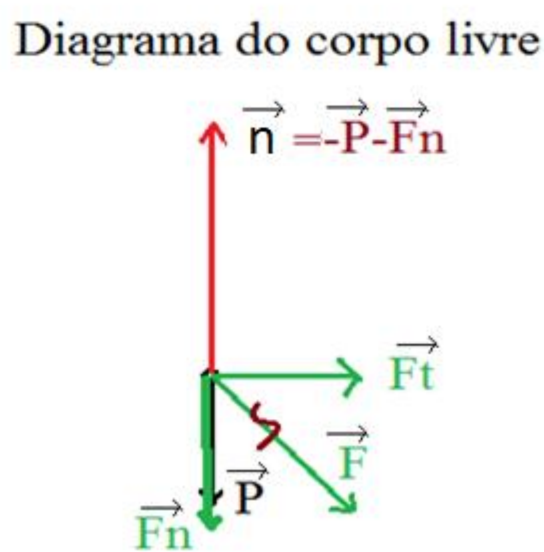
Consequências da 2ª Lei e 3ª lei

1. Dinâmica do movimento retilíneo

1.1 Ligação sem atrito

No exemplo da figura existe uma restrição ao movimento do corpo que não pode passar para baixo do plano. Existirá então uma força de ligação que, quando a ligação se faz sem atrito, é normal ao plano e dirigida de baixo para cima, $\vec{n}$, que representa a reação do plano, equilibrando o peso do corpo e a componente normal da força aplicada.



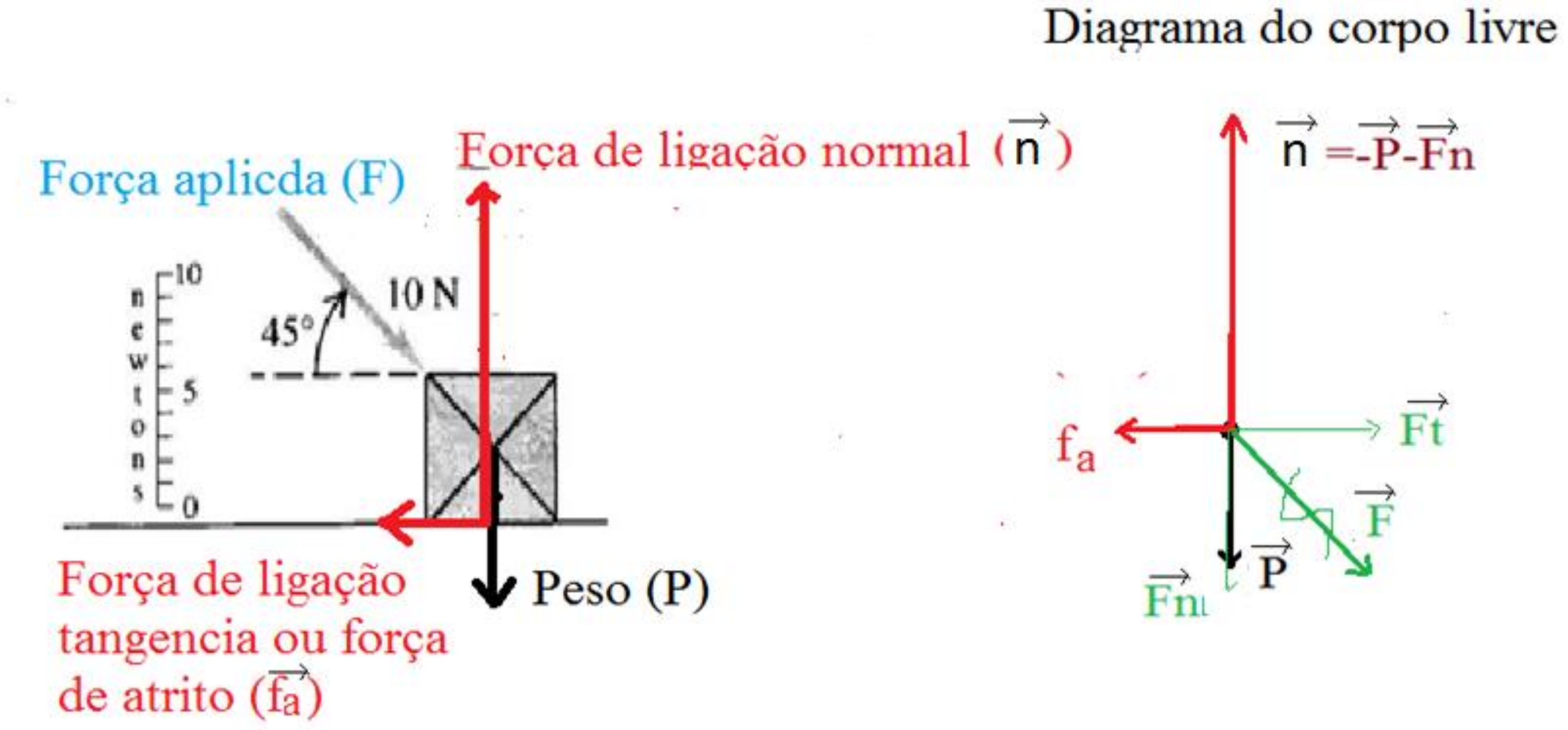


Para construir o diagrama do corpo livre consideram-se todas as forcas que atuam sobre o corpo colocadas com origem num ponto que representa o corpo. Deste modo é fácil calcular a força resultante de todas as forças que atuam sobre o corpo

Notar que ($\overrightarrow{F_n} + \vec{P}$) e $\vec{n}$ formam uma par ação-reação

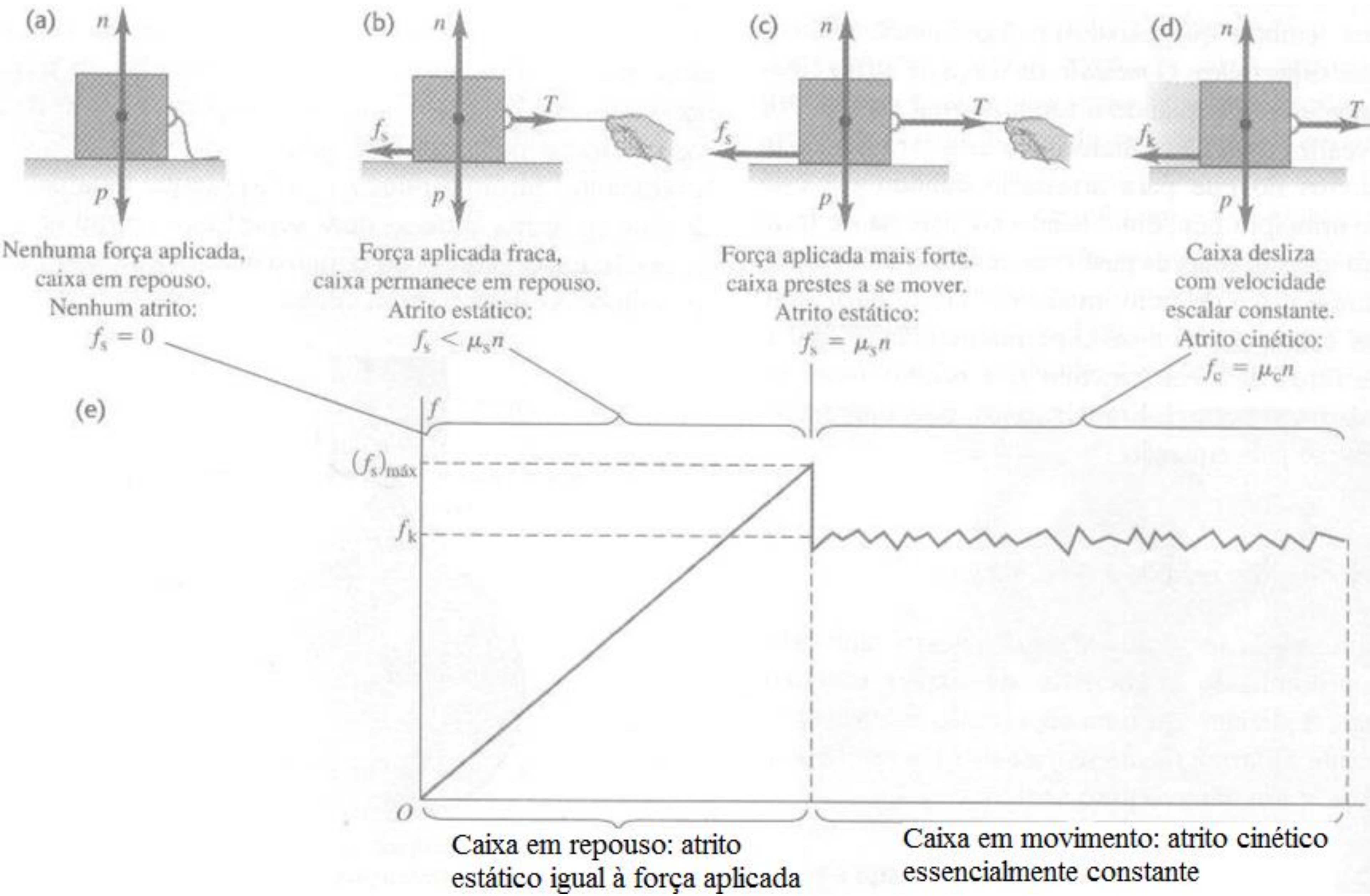
1.2 Ligação com atrito

Neste caso a Força de Ligação não é perpendicular à superfície. Para além da componente normal $\vec{n}$ que, como já se referiu, é igual e de sinal contrário à resultante das forças normais à superfície de contacto, existe ainda uma componente tangencial à superfície e que se opõe ao movimento. Esta força de ligação tangencial chama-se **Força de Atrito.**



Como já se referiu a componente normal da força de ligação é designada por $\vec{n}$ (igual e de sinal contrário à resultante das forças normais ao plano, F_N).

Variação da força de atrito com a força aplicada



Leis do atrito

A força de atrito é exercida paralelamente às superfícies de contacto (direção da tangente), no sentido contrário ao do movimento.

a) **Quando o corpo está em repouso**, a força de atrito **ESTÁTICO** opõe-se ao início do movimento. Ela tem uma valor crítico, a partir da qual não se consegue opor à força responsável pelo movimento.

Verifica-se que esse **VALOR CRÍTICO** da força de atrito (f_{aE}) é diretamente proporcional à componente normal da resultante das forças aplicadas (F_N). O fator de proporcionalidade depende das características físicas dos materiais em presença.

$$\boxed{f_{aE} = \mu_E \times F_N}$$

F_N é a componente normal da resultante das forças aplicadas. Não inclui as reações (forças de ligação):
No exemplo $F_N = F_n + P$

b) **Quando o corpo está em movimento** a força de atrito cinético (f_a) é constante e calcula-se por:

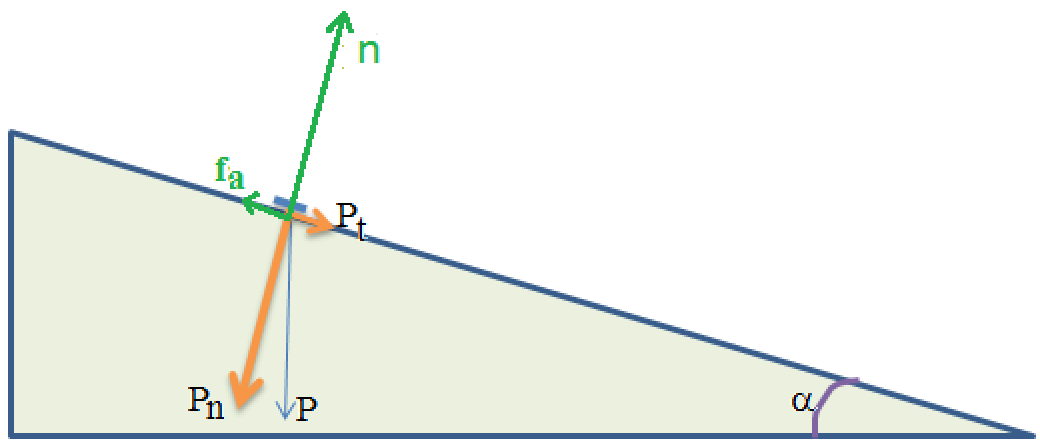
$$\boxed{f_a = \mu_c \times F_N}$$

μ_c é o coeficiente de atrito cinético , sempre inferior ao coeficiente de atrito estático.

VALORES APROXIMADOS DOS COEFICIENTES DE ATRITO

MATERIAIS	ESTÁTICO, μ_s	CINÉTICO, μ_c
Aço com aço	0,74	0,57
Alumínio com aço	0,61	0,47
Cobre com aço	0,53	0,36
Latão com aço	0,51	0,44
Zinco com ferro doce	0,85	0,21
Cobre com ferro doce	1,05	0,29
Vidro com vidro	0,94	0,40
Cobre com vidro	0,68	0,53
Teflon com Teflon	0,04	0,04
Teflon com aço	0,04	0,04
Borracha com concreto (seco)	1,00	0,80
Borracha com concreto (úmido)	0,30	0,25

Determinação experimental do coeficiente de atrito



$F_N = P_n = Pcos(\alpha)$ $P_t = Psen(\alpha)$

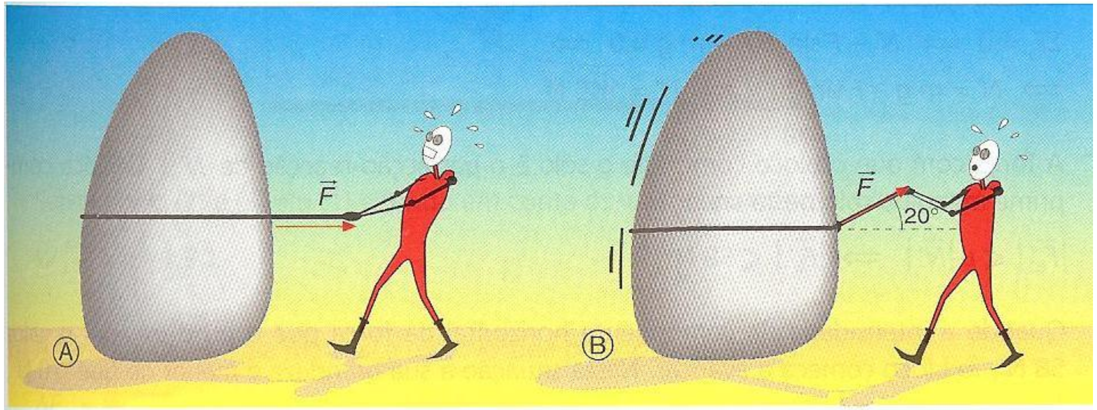
$f_{ae} = \mu_E P_n = \mu_E Pcos(\alpha)$

O estado de movimento iminente verifica-se quando:

$f_{aE} = P_t$ ou seja: $\mu_E Pcos(\alpha) = Psen(\alpha)$

$$\mu_E = \frac{sen(\alpha)}{\cos(\alpha)} = tg(\alpha)$$

PROCEDIMENTO:
Levantar lentamente o plano até que o movimento se torne iminente e medir o ângulo (atrito estático). Baixar lentamente até se obter um movimento uniforme (atrito cinético)



Na imagem anterior, considerando μ_E=0,4; m=20 kg e F=70 N.
a) Verifica-se que, quando a força é horizontal, a componente normal da resultante das forças aplicadas é igual ao peso $F_N = P = mg = 196N$

$$f_{aE} = 0.4 \times F_N \boxed{= 78.4N > 70N}$$

O bloco não se mexe. Será necessário acrescentar uma força de 8.4 N para começar a deslocar o bloco.

b) Quando a força faz um ângulo de 20 º com a horizontal tem-se:

$F_n = Fsen(20) = 23.4$ N $\qquad F_t = Fcos(20) = 65.8\ N$

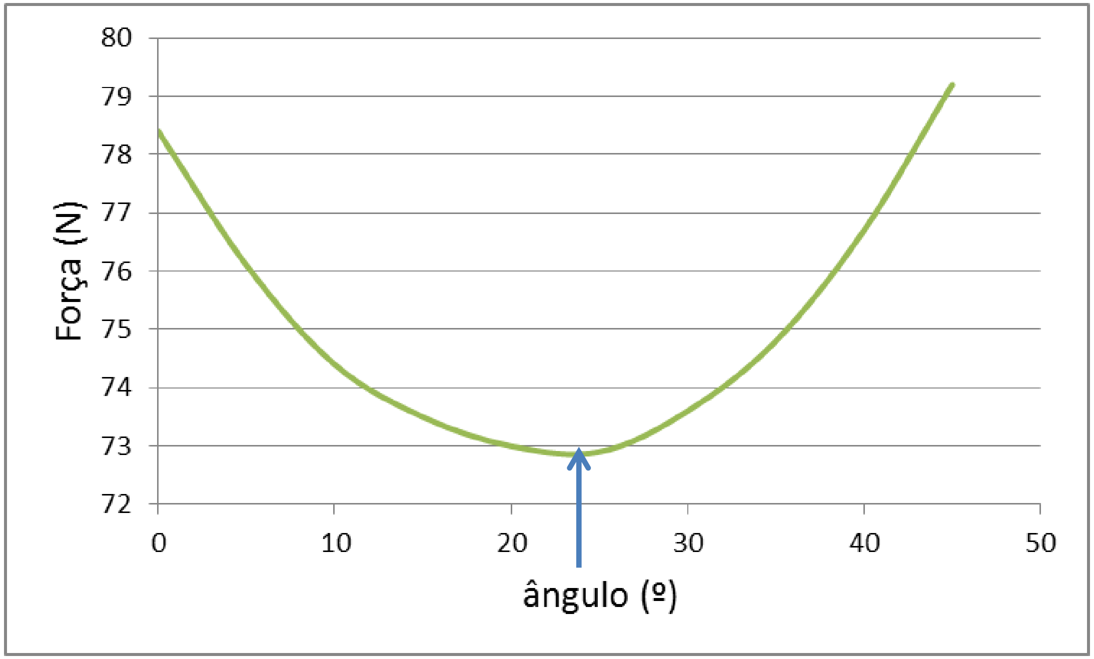
$F_N = P - F_n = 171.6$ N $\qquad f_{aE} = 0.4 \times F_N = 68.6\ N$

A força de atrito é menor, mas ligeiramente superior à componente horizontal da força aplicada, o bloco ainda não se desloca

Note-se que a força de atrito é menor porque puxando o bloco para cima se diminui a componente normal da força aplicada e portanto a compressão sobre o solo.

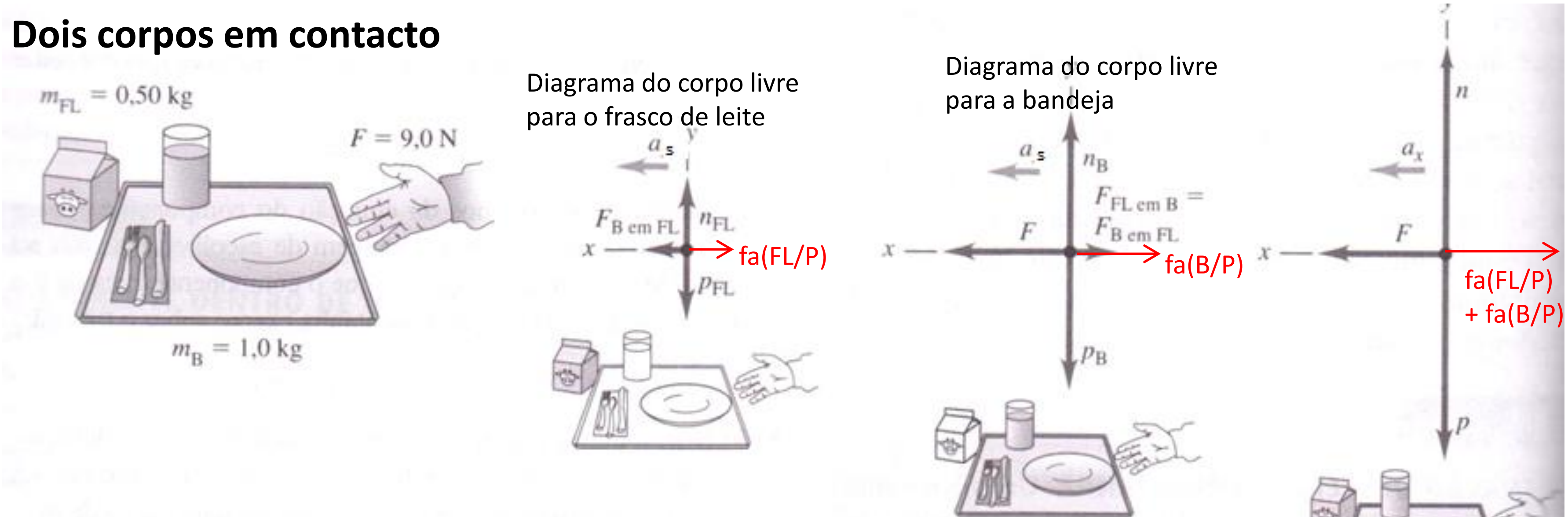
Para calcular a menor força capaz de fazer deslocar o bloco, para o ângulo de 20º, é necessário resolver o problema por um processo iterativo, uma vez que a força de atrito depende também da força aplicada. Atribui-se o valor F=71, 71.5…e verifica-se se $F_f > f_{aE}$. O valor obtido foi F=73 N, podendo concluir-se que neste caso seria suficiente aumentar a força em 3 N.

Então, qual será o ângulo para o qual a força necessário para movimentar o bloco é mínima? O problema resolve-se iterativamente para cada valor do ângulo. (ver problema desafiador 5.123 do livro)



1.3 Movimento de dois corpos com a mesma aceleração

a) Dois corpos em contacto



fa(FL/P) Força de atrito do frasco de leite com o plano da mesa

fa(B/P) Força de atrito da bandeja com o plano da mesa

Figura 5.14 Uma bandeja e um frasco de leite empurrados sobre o balcão do refeitório.

Neste tipo de problemas é mais simples fazer um diagrama do corpo livre para cada um dos corpo. No diagrama de um corpo, apenas podem aparecer as forças exercidas pelos outros corpos sobre o corpo em questão.

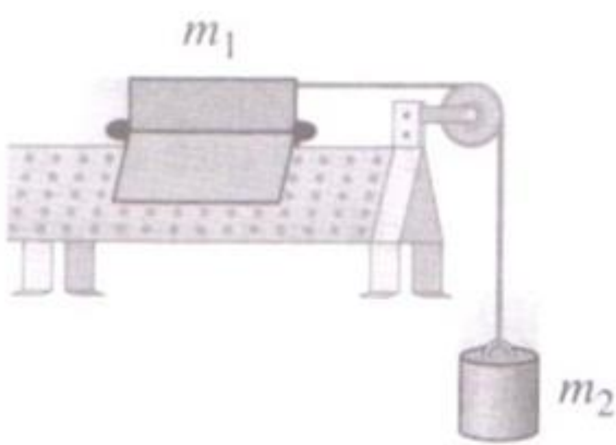
Conhece-se F e as forças de atrito, pretende-se calcular a_x.

$$\begin{cases} F_{B\ em\ FL} - f_{a(FL/P)} = m_{FL} \times a_s \\ F - F_{FL\ em\ B} - f_{a(B/P)} = m_B \times a_s \\ F_{FL\ em\ B} = -F_{B\ em\ FL} \end{cases}$$

Sistema de equações do movimento em que a_x é a aceleração conjunta dos dois corpos

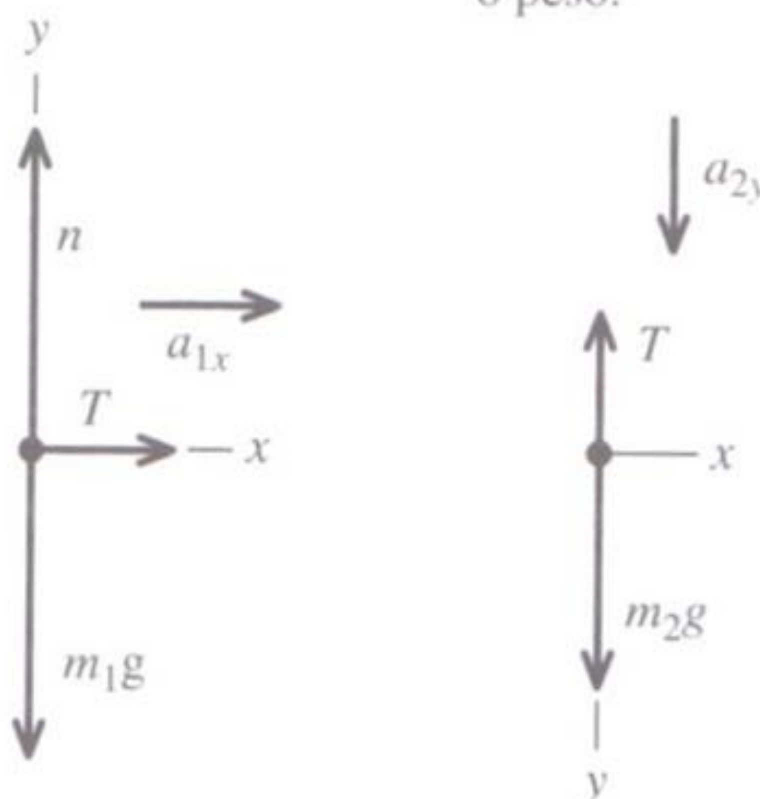
b) **Dois corpos ligados por um fio (sem atrito)**

(a) Aparato.



(b) Diagrama do corpo livre para o cavaleiro.

(c) Diagrama do corpo livre para o peso.



Em valor absoluto $a_{1x} = a_{2y} = a_s$, se o fio se poder considerar indeformável.

Este sistema de equações permite calcular a tensão no fio T e a aceleração do sistema (a_s).

$$\begin{cases} T = m_1 \times a_s \\ m_2 g - T = m_2 \times a_s \end{cases}$$

Esta segunda equação mostra que no 2º corpo, T é menor que o peso, sendo igual ao peso apenas na estática

$T = m_2 g - m_2 \times a_s$ $\qquad$ $T = (m_2 - m_1) \times a_s$

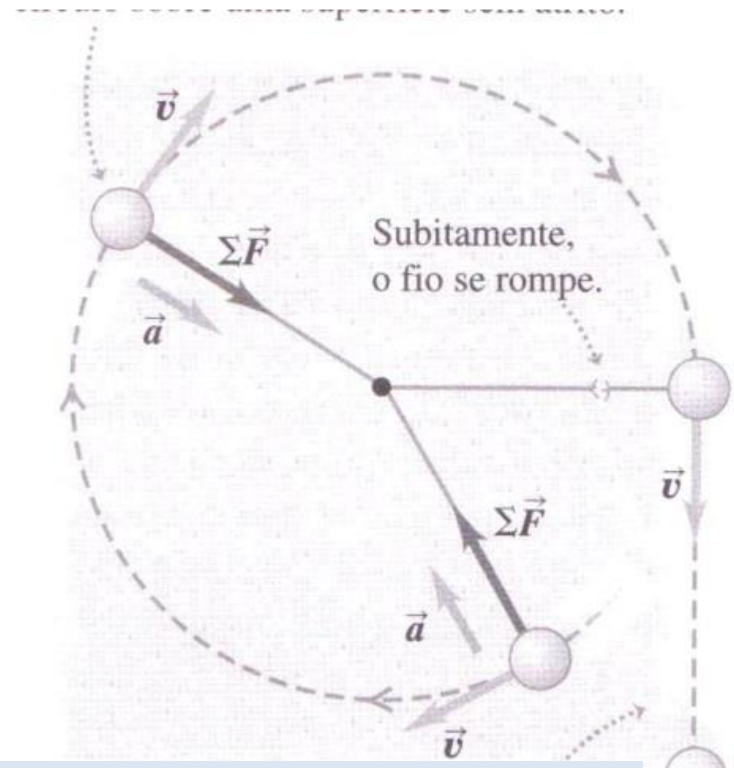
2. Dinâmica do movimento circular

Força centrípeta

O movimento circular uniforme de uma partícula pode ser produzido por *qualquer* conjunto de forças, desde que a força resultante seja sempre orientada para o centro do círculo e possua módulo constante. Facilmente se pode concluir que para calcular o módulo dessa força será, aplicando a 2ª lei de Newton

$$\boxed{F = m\frac{V^2}{r}}$$

sendo $a_c = \frac{V^2}{r}$ a aceleração centrípeta



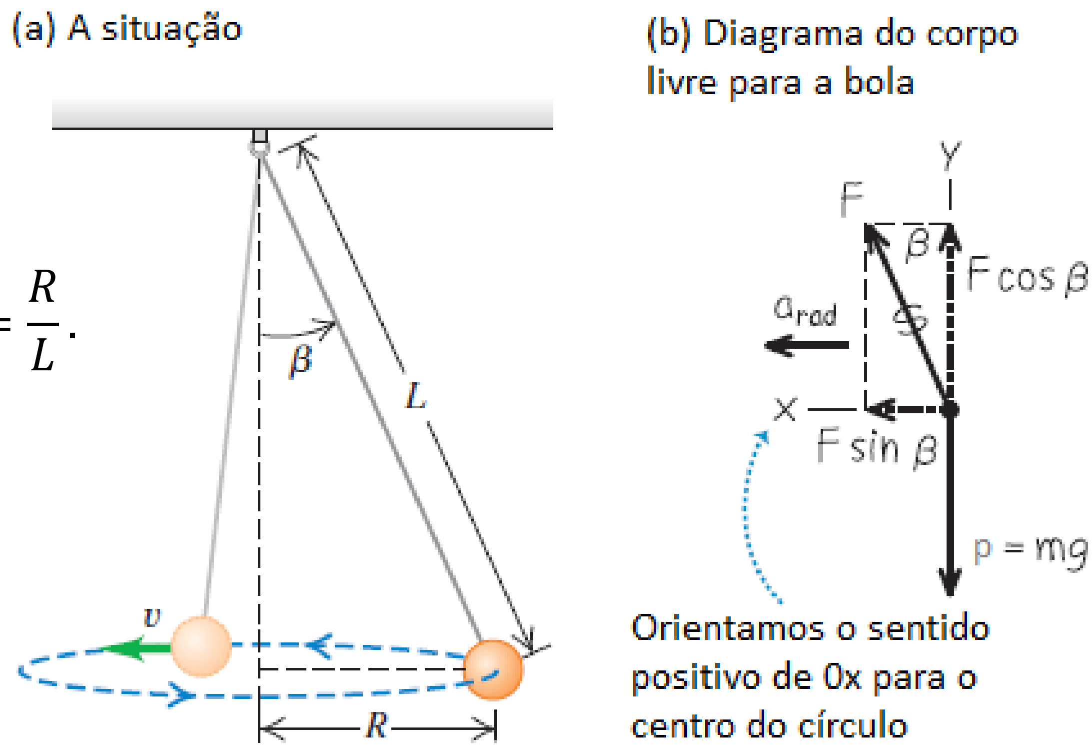
A esta força, que mantém o corpo numa trajetória circular também se chama força centrípeta.

F é a força suportada pelo fio para manter o corpo em movimento circular.

Se o fio se partir, nenhuma força fica a atuar e o corpo segue em movimento retilíneo uniforme (1ª lei de Newton), com a velocidade que tinha no momento em que se partiu o fio.

Pendulo cónico

$$sen(\beta) = \frac{R}{L}.$$

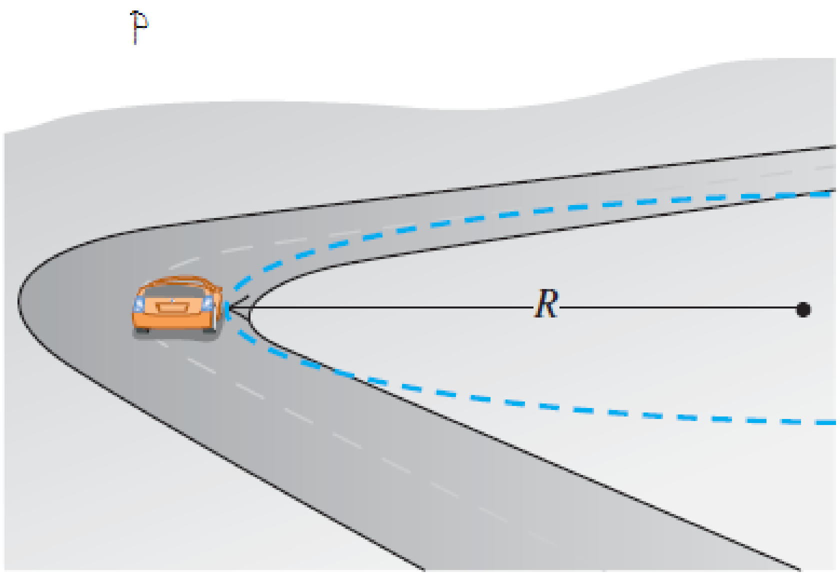


Quanto maior a velocidade, maior terá que ser $F_T sen(\beta)$.

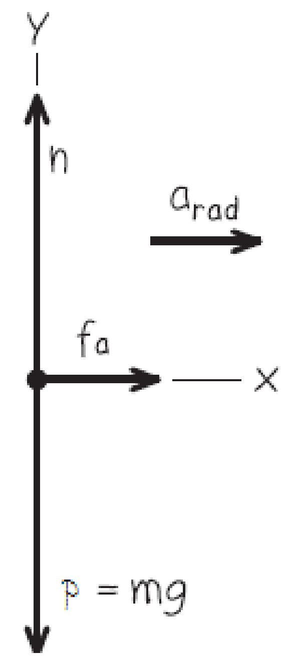
$O\ pêndulo\ vai\ subindo\ à\ medida\ que\ a\ velocidade\ aumenta$

Automóvel numa curva circular plana

(a) Carro descrevendo uma curva plana



(b) Diagrama do corpo livre do carro



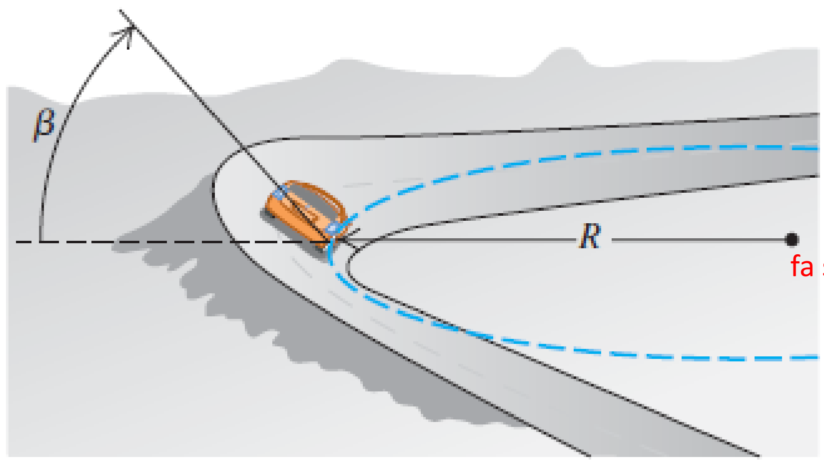
Para que o carro se mantenha na trajetória circular terá que ser:

$$f_a = \frac{mV^2}{r}$$

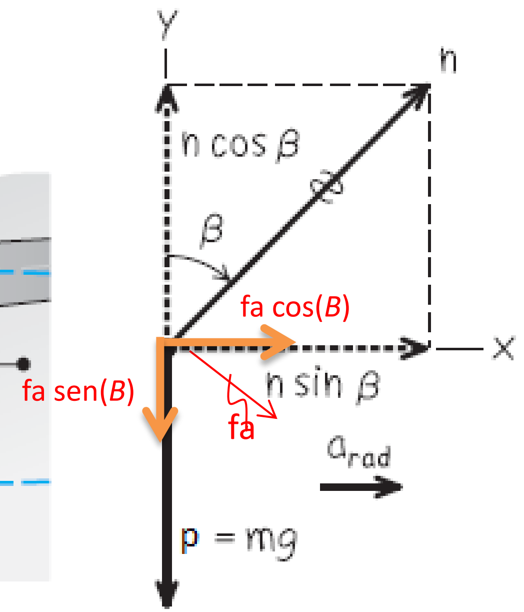
Em que *fa* é a força de atrito dos pneus com o solo.

Automóvel numa curva circular inclinada

(a) Carro a descrever uma curva inclinada



(b) Diagrama do corpo livre para o carro



Neste caso a força (fa) de atrito faz um ângulo (–*B)* com 0x e decompõe-se numa componente vertical e numa componente horizontal.

$$f_a \cos(\beta) + n\ sen(\beta) = \frac{mV^2}{r}$$