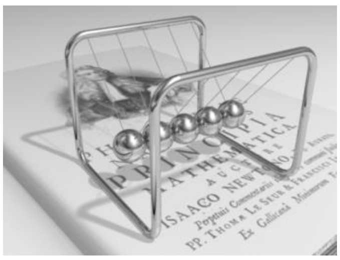
Tópicos

Conservação do momento linear;
Impulso.
Sistemas de partículas.
Centro de massa.
Sistemas de massa variável



Objetivos de aprendizagem

- Conhecer a grandeza Momento Linear
- Interpretar o Princípio da Conservação do Momento Linear como uma consequência da 1ª Lei de Newton
- Classificar as colisões como Elásticas, Inelásticas e Plásticas
- Calcular o impulso originado por uma força quando atua sobre um corpo
- Prever o movimento do centro de massa
- Aplicar o Princípio da conserva do momento linear a sistemas de massa variável

Estudo recomendado:

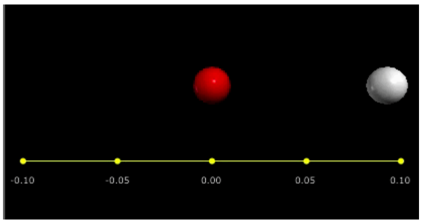
- R. Resnick, D. Halliday, "Fundamentos de Física", Livros Técnicos e Científicos Editora, Rio de Janeiro (2011) **(cap 9)**

Questão inicial

Destes dois "atletas", qual deles prefeririam placar, se corressem com a bola no vosso sentido, com a mesma velocidade?

No final do cap. 3 (parte 2) deve saber responder a esta questão

Quantidade de Movimento (ou momento linear)



Recordando a 2ª Lei de Newton

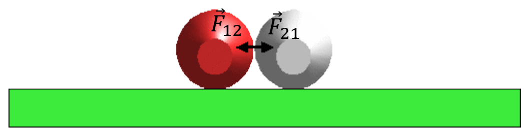
$$\vec{F} = m\vec{a}$$

$$\vec{F} = m\frac{d\vec{v}}{dt} \Leftrightarrow \vec{F} = \frac{d(m\vec{v})}{dt} \Leftrightarrow \vec{F} = \frac{d\vec{p}}{dt}$$

$$\boxed{\vec{p} = m\vec{v}}$$

Quantidade de movimento
ou Momento linear (S.I.: $kgms^{-1}$)

Num sistema isolado constituído por 2 partículas:



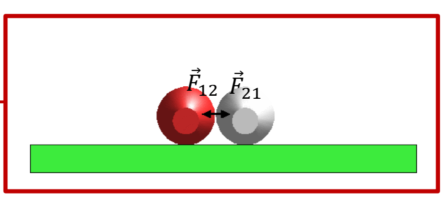
$$\vec{F}_{12} + \vec{F}_{21} = \vec{0} \Leftrightarrow m_1\vec{a}_1 + m_2\vec{a}_2 = \vec{0}$$

$$m_1\frac{d\vec{v}_1}{dt} + m_2\frac{d\vec{v}_2}{dt} = \vec{0} \Leftrightarrow \frac{d}{dt}(m_1\vec{v}_1 + m_2\vec{v}_2) = \vec{0}$$

$$\frac{d(m_1\vec{v}_1)}{dt} + \frac{d(m_2\vec{v}_2)}{dt} = \vec{0}$$

$$\frac{d(\vec{p}_1)}{dt} + \frac{d(\vec{p}_2)}{dt} = \vec{0}$$

Análise de um sistema isolado



Sistema isolado ($\sum\vec{F}_{exteriores} = \vec{0}$)

$$\frac{d}{dt}(m_1\vec{v}_1 + m_2\vec{v}_2) = \vec{0}$$

$$\frac{d}{dt}(\vec{p}_1 + \vec{p}_2) = \vec{0} \Rightarrow \vec{p}_{\text{total}} = \text{CONSTANTE}$$

Lei da Conservação do Momento Linear

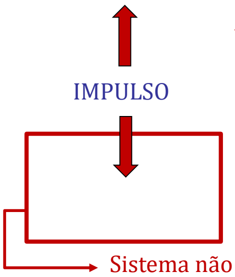
$$\boxed{\vec{p}_{1,i} + \vec{p}_{2,i} = \vec{p}_{1,f} + \vec{p}_{2,f}}$$

Quando as partículas interagem num **sistema isolado** , o momento linear total mantém-se constante.

$$\boxed{m_1\vec{v}_{1,i} + m_2\vec{v}_{2,i} = m_1\vec{v}_{1,f} + m_2\vec{v}_{2,f}}$$

Num sistema isolado o momento linear total mantém-se constante, mas o momento linear de cada partícula do sistema pode variar.

Análise de um sistema não isolado



Sistema não isolado
($\sum \vec{F}_{exteriores} \neq \vec{0}$)

$$\vec{F} = \frac{d\vec{p}}{dt} \Leftrightarrow \vec{F}\,dt = d\vec{p} \Leftrightarrow \boxed{\int_{t_0}^{t_1} \vec{F}\,dt = \int_{\vec{p}_0}^{\vec{p}_1} d\vec{p}}$$

$$\vec{I} = \Delta\vec{p}$$

Impulso de uma força ($\vec{I}$)
S.I.:(N.s = kg.m.s^{-1})

Teorema do impulso-quantidade de movimento

A variação da quantidade de movimento é igual ao impulso da resultante das forças exteriores aplicadas ao sistema.

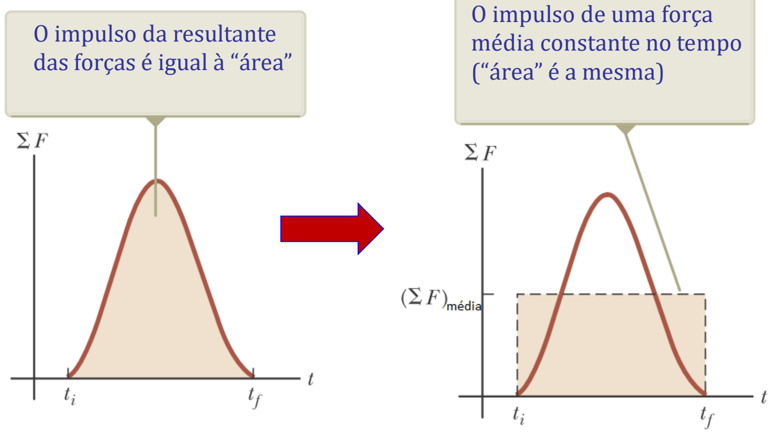
Se $\vec{F}$ for constante no tempo:

$$\vec{F}\Delta t = \Delta\vec{p}$$

Em geral, a força não é constante

$$\vec{F} = \frac{d\vec{p}}{dt}$$

Variação típica da força durante a colisão.



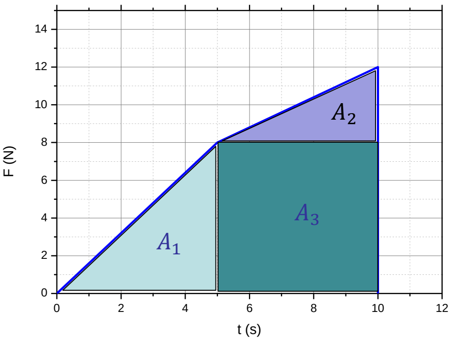
$$\Rightarrow \vec{I} = \int_{t_i}^{t_f} \vec{F}\,dt = \Delta\vec{p}$$

$$\vec{I} = \bar{\vec{F}}\Delta t = \Delta\vec{p}$$

CHECKPOINT 3.2.1

A força resultante aplicada a corpo, inicialmente em repouso, de massa 100 kg, tem uma direção constante e o **seu módulo varia em função do tempo** do modo como a figura mostra.

Calcular o módulo da velocidade final do corpo.

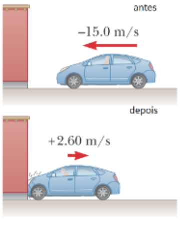


CHECKPOINT 3.2.2

Num teste de embate frontal, um carro de massa 1500 kg
Colide com uma parede. As velocidades iniciais e finais do carro são $\vec{v}_i = -15.0\hat{\imath}$ (m/s) e $\vec{v}_f = 2.60\hat{\imath}$ (m/s), respetivamente.

1 - Se o tempo da colisão for igual a 0.150 s, determine:

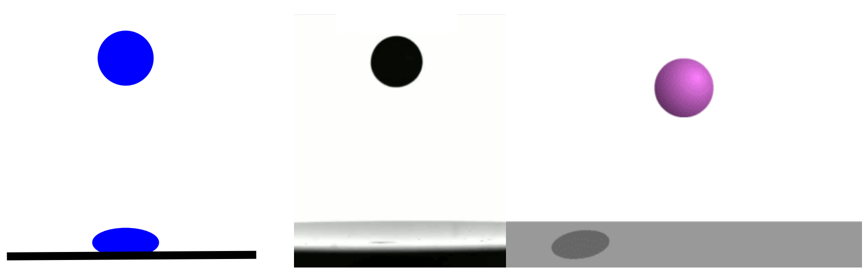
a) O impulso durante a colisão
b) A força média resultante exercida no caro



2 – Suponha agora que o tempo de colisão é o mesmo, mas o carro não recua ($\vec{v}_f = 0$ (m/s)).
Nestas condições a força média resultante no carro é maior ou menor que a determinada na alínea b) ? Comente o resultado.

Colisões a 1D em sistemas isolados

Colisões 1D sem ação de forças exteriores

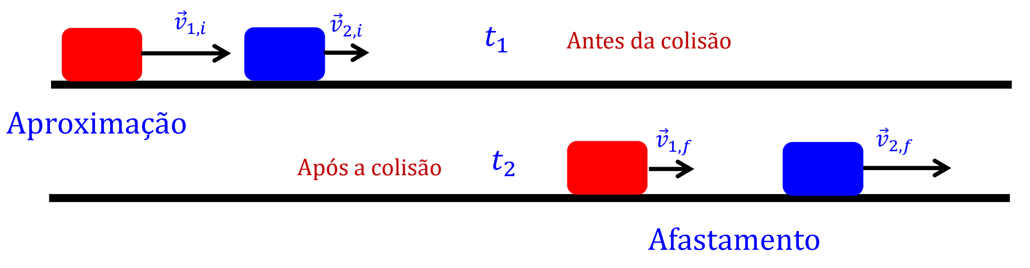


Perfeitamente inelástica | Inelástica | Elástica

Para analisar as colisões (choques) há três conceitos a ter em consideração:

- Momento linear (quantidade de movimento) ($\vec{p}$)
- Energia cinética (E_c)
- Coeficiente de restituição (e)

O que é o coeficiente de restituição (e)?



Coeficiente de restituição:

$$e = \frac{v_{\text{afastamento}}}{v_{\text{aproximação}}} = \frac{|v_{2,f} - v_{1,f}|}{|v_{1,i} - v_{2,i}|}$$

Colisões elásticas (exemplo 1)

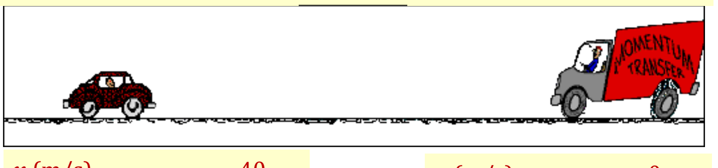
$m = 1000$ kg

v (m/s)	+20
p (kg m/s)	+20 000

antes

$m = 3000$ kg

v (m/s)	-20
p (kg m/s)	-60 000



v (m/s)	-40
p (kg m/s)	-40 000

após

v (m/s)	0
p (kg m/s)	0

p / kg m s^{-1}	Inicial	Final
Carro	2.0×10^4	-4.0×10^4
Camião	-6.0×10^4	0.0
Total	-4.0×10^4	-4.0×10^4

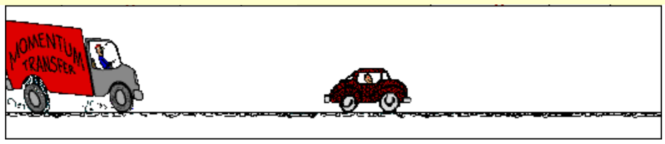
E_c / J	Inicial	Final
Carro	2.0×10^5	8.0×10^5
Camião	6.0×10^5	0.0
Total	8.0×10^5	8.0×10^5

$$e = \frac{v_{\text{afastamento}}}{v_{\text{aproximação}}} = \frac{|v_{2,f} - v_{1,f}|}{|v_{1,i} - v_{2,i}|}$$

Velocidade de afastamento	40 ms^{-1}
Velocidade de aproximação	40 ms^{-1}
Coeficiente de restituição	1

Colisões elásticas (exemplo 2)

m = 3000 kg			m = 1000 kg	
v (m/s)	+20	antes	v (m/s)	0
p (kg m/s)	+60 000		p (kg m/s)	0



v (m/s)	10	após	v (m/s)	30
p (kg m/s)	30 000		p (kg m/s)	30 000

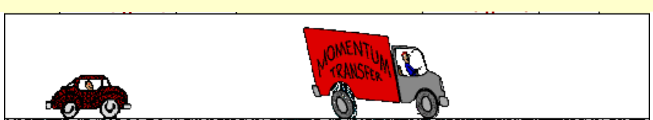
p / kg m s^{-1}	Inicial	Final
Carro	0.0	3.0×10^4
Camião	6.0×10^4	3.0×10^4
Total	6.0×10^5	6.0×10^4

E_c / J	Inicial	Final
Carro	0.0	4.5×10^5
Camião	6.0×10^5 J	1.5×10^5
Total	6.0×10^5	6.0×10^5

Velocidade de afastamento	20 ms^{-1}
Velocidade de aproximação	20 ms^{-1}
Coeficiente de restituição	1

Colisões elásticas (exemplo 3)

m = 1000 kg			m = 3000 kg	
v (m/s)	+20	antes	v (m/s)	0
p (kg m/s)	+20 000		p (kg m/s)	0



v (m/s)	-10	após	v (m/s)	10
p (kg m/s)	-10 000		p (kg m/s)	30 000

p / kg m s^{-1}	Inicial	Final
Carro	2.0×10^4	-1.0×10^4
Camião	0.0	3.0×10^4
Total	2.0×10^4	2.0×10^4

E_c / J	Inicial	Final
Carro	2.0×10^5	0.5×10^5
Camião	0.0	1.5×10^5
Total	2.0×10^5	2.0×10^5

Velocidade de afastamento	20 ms^{-1}
Velocidade de aproximação	20 ms^{-1}
Coeficiente de restituição	1

Colisões elásticas

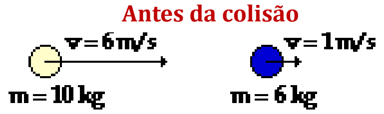
- Conservação do momento linear: $\vec{p}_i = \vec{p}_f$
- Conservação da energia cinética: $E_{ci} = E_{cf}$
- Coeficiente de restituição: $e = 1$

Para baixos valores de v, os choques entre automóveis são praticamente elásticos.

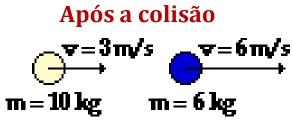
Os para-choques são suficientemente elásticos para que isso aconteça.

Colisões inelásticas (exemplo 1)

Antes da colisão



Após a colisão



p / kg m s^{-1}	Inicial	Final
amarela	60.0	30.0
azul	6.0	36.0
Total	66.0	66.0

E_c / J	Inicial	Final
amarela	180.0	45.0
azul	3.0	108.0
Total	183.0	153.0

Velocidade de afastamento	3.0 ms^{-1}
Velocidade de aproximação	5.0 ms^{-1}
Coeficiente de restituição	0.6

Colisões inelásticas

- Conservação do momento linear $\vec{p}_i = \vec{p}_f$
- Não há conservação da energia cinética: $E_{ci} > E_{cf}$
- Coeficiente de restituição: $0 < e < 1$

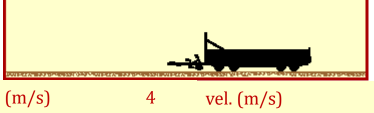
A quase totalidade dos choques pertence a esta categoria.

Colisões totalmente inelásticas (ou plásticas) (exemplo 1)

Corpos ficam juntos após a colisão

antes

locomotiva		vagão	
m = 8000 kg		m = 2000 kg	
Vel. (km/hr)	5	Vel. (km/hr)	0
Mom. (kg km/hr)	40 000	Mom. (kg km/hr)	0



após

vel. (m/s)	4	vel. (m/s)	4
mom. (kg m/s)	32 000	mom. (kg m/s)	8 000

p / kg m s^{-1}	Inicial	Final
Locomotiva	4.0×10^4	3.2×10^4
vagão	0.0	0.8×10^4
Total	4.0×10^4	4.0×10^4

E_c / J	Inicial	Final
Locomotiva	1.0×10^5	6.4×10^4
vagão	0.0	1.6×10^4
Total	1.0×10^5	8.0×10^4

Velocidade de afastamento	0 m s^{-1}
Velocidade de aproximação	5 m s^{-1}
Coeficiente de restituição	0

Colisões totalmente inelásticas (ou plásticas) (exemplo 2)

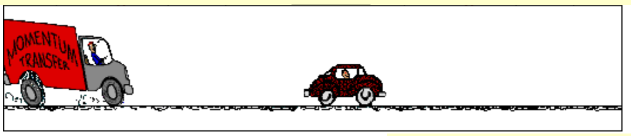
m = 3000 kg

v (m/s)	+20
p (kg m/s)	+60 000

antes

m = 1000 kg

v (m/s)	0
p (kg m/s)	0



v (m/s)	+15
p (kg m/s)	+45 000

após

v (m/s)	+15
p (kg m/s)	+15 000

p / kg m s^{-1}	Inicial	Final
Camião	6.0×10^4	4.5×10^4
Carro	0.0	1.5×10^4
Total	6.0×10^4	6.0×10^4

E_c / J	Inicial	Final
Camião	6.0×10^5	33.75×10^4
Carro	0.0	11.25×10^4
Total	6.0×10^5	4.5×10^5

Velocidade de afastamento	0 ms^{-1}
Velocidade de aproximação	20 ms^{-1}
Coeficiente de restituição	0

Colisões totalmente inelásticas (ou plásticas) (exemplo 3)

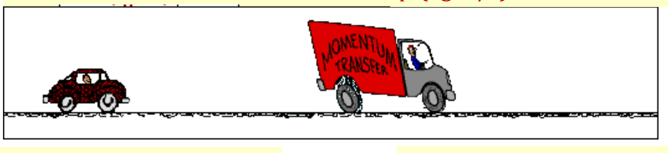
m = 1000 kg

v (m/s)	+20
p (kg m/s)	+20 000

antes

m = 3000 kg

v (m/s)	0
p (kg m/s)	0



v (m/s)	+5
p (kg m/s)	+5 000

após

v (m/s)	+5
p (kg m/s)	+15 000

p / kg m s^{-1}	Inicial	Final
Carro	2.0×10^4	0.5×10^4
Camião	0.0	1.5×10^4
Total	2.0×10^4	2.0×10^4

E_c / J	Inicial	Final
Carro	2.0×10^5	1.25×10^4
Camião	0.0	3.75×10^4
Total	2.0×10^5	5.0×10^4

Velocidade de afastamento	0 ms^{-1}
Velocidade de aproximação	20 ms^{-1}
Coeficiente de restituição	0

Colisões totalmente inelásticas (ou plásticas)

Corpos seguem juntos após colisão

- Conservação do momento linear: $\vec{p}_i = \vec{p}_f$
- Não há conservação da energia cinética: $E_{ci} > E_{cf}$
- Coeficiente de restituição: $e = 0$

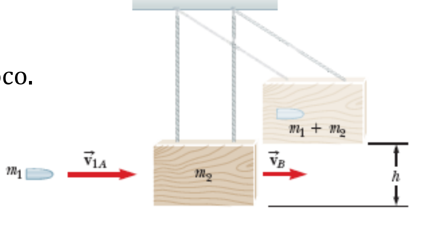
CHECKPOINT 3.2.3

Uma bala de massa m_1 = 0,05 kg é disparada horizontalmente com uma velocidade de v_{1A} = 500,00 m/s na direcção de um bloco de massa m_2 = 5 kg, que se encontra suspenso do tecto (ver esquema). A bala fica encravada no bloco. Os atritos com o ar e o efeito da gravidade sobre a bala são desprezáveis neste problema. Calcule:

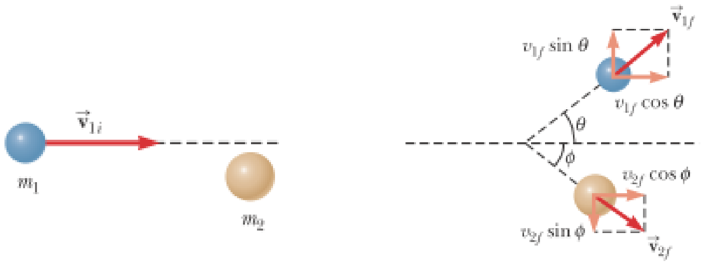
a) O valor da velocidade do bloco (v_B) após o impacto da bala.

b) A altura máxima (h) atingida pelo bloco.

c) A energia mecânica dissipada no impacto da bala sobre o bloco.



Colisões 2D sem ação de forças exteriores



Colisões 2D

Para todos os tipos de choques sem interações externas: Conservação de momento linear

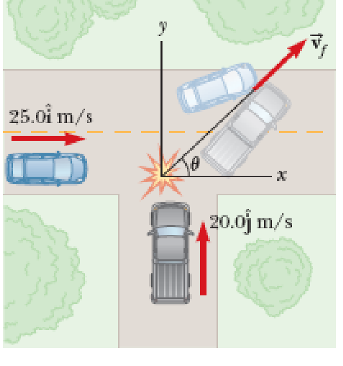
$$\vec{p}_{1,i} + \vec{p}_{2,i} = \vec{p}_{1,f} + \vec{p}_{2,f} \Leftrightarrow \begin{cases} m_1\vec{v}_{1,ix} + m_2\vec{v}_{2,ix} = m_1\vec{v}_{1,fx} + m_2\vec{v}_{2,fx} \\ m_1\vec{v}_{1,iy} + m_2\vec{v}_{2,iy} = m_1\vec{v}_{1,fy} + m_2\vec{v}_{2,fy} \end{cases}$$

Para todos os choques elásticos: Conservação da Energia Cinética

$$E_{c1,i} + E_{c2,i} = E_{c1,f} + E_{c2,f}$$

CHECKPOINT 3.2.4

O carro, com 1500 kg colide, na intersecção perpendicular de duas estradas, com uma pick-up de 2500 kg. As velocidades de cada veículo estão representadas na figura. Após o choque os veículos ficam juntos e escorregam num determinado sentido. Qual a direção e a velocidade do conjunto imediatamente após a colisão?

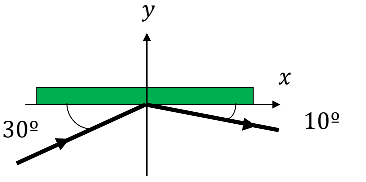


CHECKPOINT 3.2.5

A figura corresponde à vista de cima do percurso realizado por um piloto (de massa 80 kg) quando o seu carro colide com o muro da pista. No instante antes da colisão ele desloca-se com uma velocidade de 70 m/s, em linha reta, com uma direção que forma um ângulo de 30º com a direção do muro, enquanto que após o choque a sua velocidade é de 50 m/s com um ângulo de 10º em relação ao muro.

a) Qual foi o impulso, $\vec{I}$, no piloto devido à colisão?

b) A duração da colisão foi de 14 ms. Qual o valor médio da força a que o piloto ficou sujeito?



CENTRO DE MASSA

Até este ponto da matéria lecionada nunca nos preocupamos com as dimensões dos corpos (considerados rígidos, até agora), apesar de podermos tê-los representado com formas específicas (como carros, blocos, bolas, etc…).

Até este ponto da matéria lecionada, considerou-se que toda a massa do corpo rígido estava concentrada num ponto, designado por **Centro de Massa**.

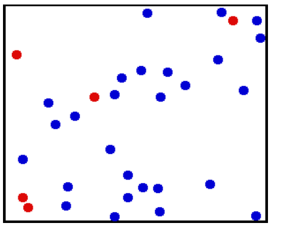
Resolveram-se os problemas e discutiram-se as questões de acordo com o modelo da partícula material. Os corpos não tinha dimensão (eram pontos).

Se um determinado corpo rígido, com uma forma caraterística, estiver em repouso, o **Centro de Massa** dessa distribuição de massa (que é o corpo) é um ponto onde, se uma força resultante for aplicada nesse ponto, o corpo acelera no sentido da força, de acordo com a 2ª lei de Newton, sem sofrer rotação.

Um ponto especial…

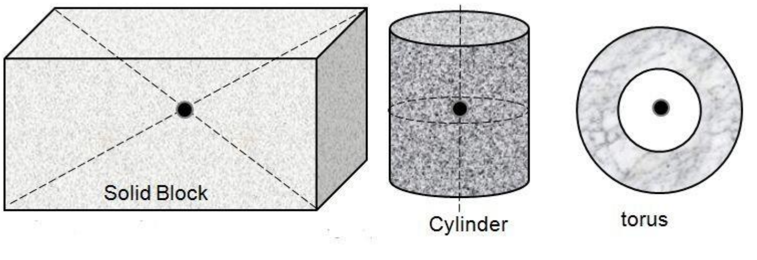
Um corpo sendo rígido, ou não, é constituído por um conjunto de partículas.

Se a resultante das forças exteriores aplicadas num sistema de partículas for nula, mesmo que a velocidade das partículas individualmente possa variar, existe um ponto associado ao conjunto de partículas do Sistema, que tem aceleração nula (velocidade constante).

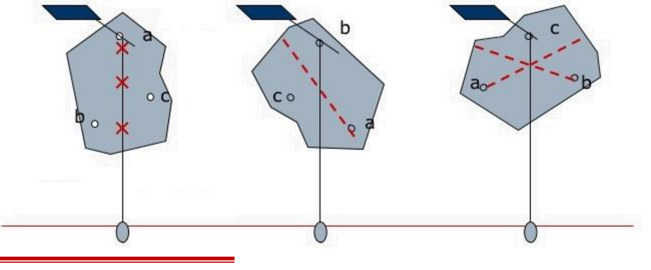


Este ponto designa-se por **Centro de Massa** do Sistema.

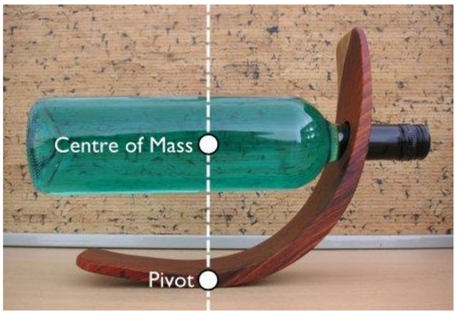
O CM de um sólido regular rígido e homogéneo coincide com o centro geométrico do corpo.

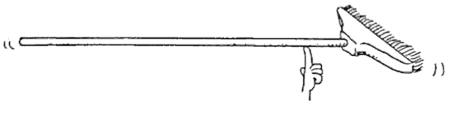


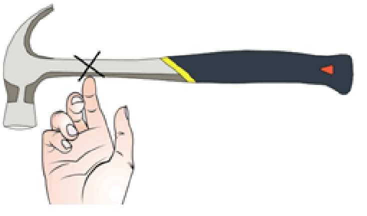
O CM de um sólido irregular rígido homogéneo, ou não, pode ser mais difícil de calcular. No caso de uma lâmina irregular:



Centro de Massa (CM)

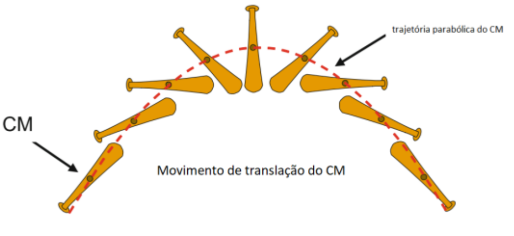






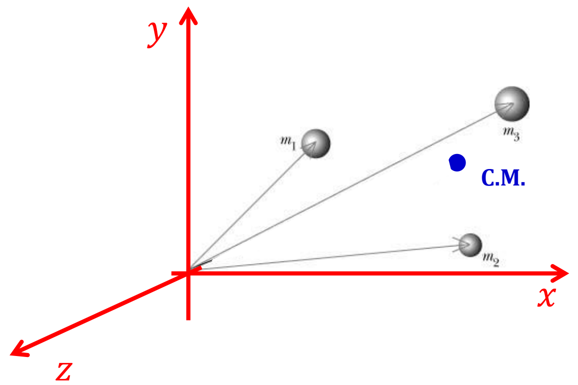
Centro de Massa (CM)

Mas mesmo que o corpo rígido sofra translação, em rotação, o centro de massa do corpo é o ponto que se move como se toda a massa do sistema estivesse concentrada nesse ponto, onde todas as força externas estão aplicadas.



Determinação do Centro de Massa

No caso de um sistemas constituído por várias particular como se determina a posição do CM ($\vec{r}_{CM}$)?



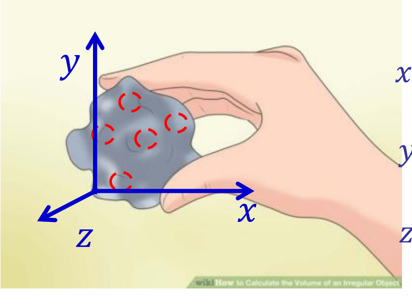
$$\begin{cases} x_{CM} = \dfrac{\sum_{i=1}^{n} m_i x_i}{M} \\ y_{CM} = \dfrac{\sum_{i=1}^{n} m_i y_i}{M} \\ z_{CM} = \dfrac{\sum_{i=1}^{n} m_i z_i}{M} \end{cases}$$

$$\sum_{i=1}^{n} m_i = M$$

$$\boxed{\vec{r}_{CM} = \frac{\sum_{i=1}^{n} m_i \vec{r}_i}{\sum_{i=1}^{n} m_i} = \frac{\sum_{i=1}^{n} m_i \vec{r}_i}{M}}$$

Determinação do Centro de Massa

Sólido irregular homogéneo



$$x_{CM} = \frac{1}{M}\int x\,dm \qquad y_{CM} = \frac{1}{M}\int y\,dm \qquad z_{CM} = \frac{1}{M}\int z\,dm$$

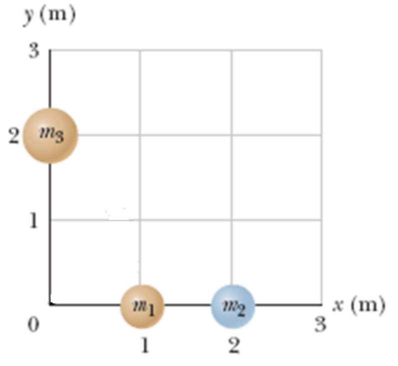
$$\rho = \frac{M}{V} = \frac{dm}{dV}$$

$$dm = \frac{M\,dV}{V}$$

$$x_{CM} = \frac{1}{V}\int x\,dV \qquad y_{CM} = \frac{1}{V}\int y\,dV \qquad z_{CM} = \frac{1}{V}\int z\,dV$$

Checkpoint 3.2.6

Considere o sistema de 3 partículas em que $m_1 = m_2 = 1$ kg e $m_3 = 2$ kg. Calcule a posição do centro de massa do sistema?



Movimento do Centro de Massa

$$\vec{r}_{CM} = \frac{\sum_{i=1}^{n} m_i \vec{r}_i}{M} \Rightarrow \qquad \vec{v}_{CM} = \frac{d\vec{r}_{CM}}{dt} = \frac{1}{M}\sum_{i=1}^{n} m_i \frac{d\vec{r}_i}{dt} \Rightarrow \qquad \boxed{\vec{v}_{CM} = \frac{1}{M}\sum_{i=1}^{n} m_i\, \vec{v}_i}$$

Num sistema de partículas podem atuar:

- Forças interiores (nas interações entre as partículas);
- Forças exteriores.

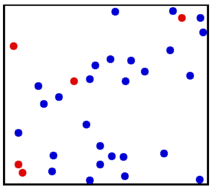
As forças interiores anulam-se (de acordo com a 3ª lei de Newton).

As forças exteriores podem ou não ser nulas

Movimento do Centro de Massa

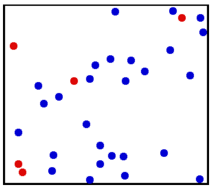
$$\boxed{\vec{v}_{CM} = \frac{1}{M}\sum_{i=1}^{n} m_i\,\vec{v}_i}$$

Se $\vec{F}_{ext} = \vec{0}$



$\vec{v}_{CM} = \vec{0}$ ou $\vec{v}_{CM} = \text{constante}$

Se $\vec{F}_{ext} \neq \vec{0}$



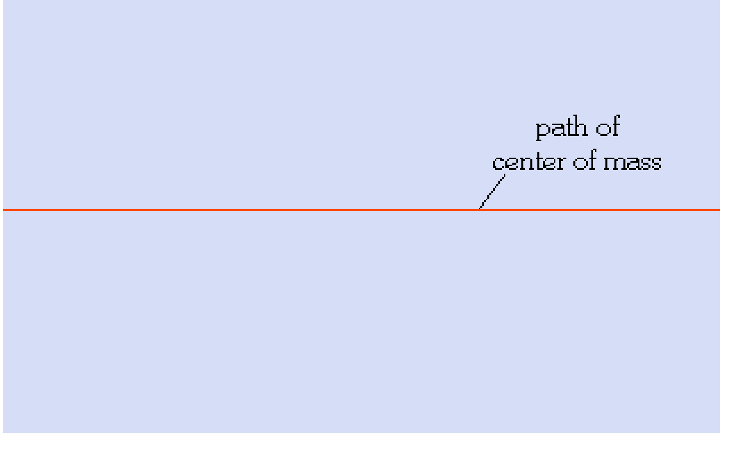
$$\vec{a}_{CM} = \frac{d\vec{v}_{CM}}{dt} = \frac{1}{M}\sum_{i=1}^{n} m_i \frac{d\vec{v}_i}{dt}$$

$$\boxed{\vec{a}_{CM} = \frac{1}{M}\sum_{i=1}^{n} m_i\,\vec{a}_i}$$

Quantidade de Movimento do Centro de Massa

$$\vec{v}_{CM} = \frac{1}{M}\sum_{i=1}^{n} m_i\,\vec{v}_i = \frac{1}{M}\sum_{i=1}^{n} \vec{p}_i \quad \Leftrightarrow \vec{v}_{CM} = \frac{1}{M}\vec{p}_{total}$$

$$\boxed{\vec{p}_{total} = M\vec{v}_{CM}}$$



CHECKPOINT 3.2.7

Um projétil é atirado verticalmente para cima. Quando estava a 1000 m de altitude, com uma velocidade de 300 m s^{-1}, explode e separa-se em três fragmentos de massa igual. O primeiro fragmento tem velocidade com sentido para cima de 450 m s^{-1}. O segundo fragmento tem velocidade para este com 240 m s^{-1}.

a)Qual a velocidade do terceiro fragmento?

b) Qual a posição do centro de massa do sistema, relativamente ao solo, 3 segundos após a explosão?

SISTEMAS DE MASSA VARIÁVEL

Sistemas com massa variável

A força de atrito da estrada sobre o pneu do automóvel é que propulsionar o carro.

No espaço, as naves não têm um piso para que a força de atrito de escorregamento as possa propulsionar.

SISTEMAS DE MASSA VARIÁVEL

$$\vec{F}_R = \frac{d\vec{p}}{dt} = \frac{d(m\vec{v})}{dt} \Leftrightarrow \vec{F}_R = m\frac{d\vec{v}}{dt} + \vec{v}\frac{dm}{dt}$$

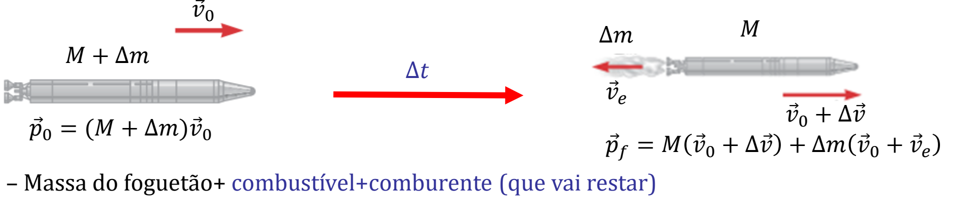
Se a massa não variar, o último termo desaparece e obtemos a forma já conhecida da 2ª lei de Newton:

$$\vec{F}_R = m\frac{d\vec{v}}{dt} = m\vec{a}$$

Nos casos em que a massa varia (por exemplo foguetes que queimam grande quantidade de combustível) tem de se usar a expressão completa e nesse caso a forma correta da 2ª lei de Newton é:

$$\vec{F}_R = \frac{d\vec{p}}{dt} = m\frac{d\vec{v}}{dt} + \vec{v}\frac{dm}{dt}$$

EXEMPLO DOS FOGUETÕES NO ESPAÇO



M – Massa do foguetão+ combustível+comburente (que vai restar)
Δm – massa dos gases de escape (combustível+comburente, após a combustão)
$\vec{v}_0$ - Velocidade inicial do conjunto relativamente à Terra

$\Delta\vec{v}$ - aumento de velocidade do foguetão relativamente à Terra
$\vec{v}_e$ - velocidade dos gases de escape relativamente ao foguetão
$\vec{v}_0 + \vec{v}_e$ - velocidade dos gases de escape relativamente à Terra

Sendo um sistema isolado: $\vec{p}_0 = \vec{p}_f$

$$(M + \Delta m)v_0 = M(v_0 + \Delta v) + \Delta m(v_0 - v_e) \Leftrightarrow Mv_0 + \Delta m v_0 = Mv_0 + M\Delta v + \Delta m v_0 - \Delta m v_e$$

$$0 = M\Delta v - \Delta m v_e \Leftrightarrow M\Delta v = \Delta m v_e$$

Considerando o intervalo de tempo $\Delta t \to 0$, tem-se: $\Delta v \to dv$ e $\Delta m \longrightarrow dm$

$$Mdv = dmv_e$$

$$Mdv = dmv_e$$

O aumento na massa dos gases de escape (dm) corresponde a uma diminuição da massa do sistema ($-dM$)

$$Mdv = -dMv_e$$

Dividindo por dt:

$$M\frac{dv}{dt} = -v_e\frac{dM}{dt}$$

$$dv = -\frac{dM}{M}v_e \Leftrightarrow \int_{v_0}^{v_f} dv = -v_e\int_{M_0}^{M_f}\frac{dM}{M}$$

$$\Leftrightarrow v_f - v_0 = -v_e \ln\frac{M_f}{M_0} \Leftrightarrow \boxed{v_f - v_0 = v_e \ln\frac{M_0}{M_f}}$$

Obtém-se a **força propulsora** (***thrust***) que é a força que os gases de escape exercem no foguetão:

$$\boxed{F_{\text{propulsora}} = M\frac{dv}{dt} = -v_e\frac{dM}{dt}}$$

Que é proporcional à velocidade dos gases de escape e à **taxa com que massa varia** (***burn rate***)

Para uma grande variação velocidade do foguetão:

- a velocidade dos gases de escape deve ser a maior possível;
- a razão das massas deve ser a maior possível.

Checkpoint 3.2.8

Os foguetões Saturno V (das missões Apollo) tinham uma massa de 2.85×10^6 kg em condições de lançamento. A carga útil do Saturno V era somente 27% da massa em condições de partida. Os motores consumiam combustível à taxa de 13.84×10^3 kg/s e a força propulsora era de 34×10^6 N.

a) Qual o valor da velocidade dos "gases de escape";
b) Qual a duração da combustão (tempo que os motores levam a consumir o combustível).

c) Qual o valor da aceleração no lançamento (aceleração inicial)
d) Qual o valor da aceleração no final (após toda a combustão do combustível)

Relembre os objetivos de aprendizagem…..

Objetivos de aprendizagem

- Conhecer a grandeza Momento Linear
- Interpretar o Princípio da Conservação do Momento Linear como uma consequência da 1ª Lei de Newton
- Classificar as colisões como Elásticas, Inelásticas e Plásticas
- Calcular o impulso originado por uma força quando atua sobre um corpo
- Prever o movimento do centro de massa
- Aplicar o Princípio da conserva do momento linear a sistemas de massa variável

… certifique-se que foram atingidos.