



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO

Instituto de Física

Programa de Pós-Graduação em Ensino de Física

Mestrado Profissional em Ensino de Física

**QUANTIDADE DE MOVIMENTO E SUA CONSERVAÇÃO – UMA NOVA
PROPOSTA PARA O ENSINO MÉDIO**

Fausto Ferreira Faria

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ensino de Física, Instituto de Física, Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Ensino de Física.

Orientador:

Antônio Carlos Fontes dos Santos

Rio de Janeiro

Dezembro de 2015

RESUMO

QUANTIDADE DE MOVIMENTO E SUA CONSERVAÇÃO – UMA NOVA PROPOSTA PARA O ENSINO MÉDIO

Fausto Ferreira Faria

Orientador:

Antônio Carlos Fontes dos Santos

Resumo da dissertação de Mestrado submetida ao Programa de Pós-Graduação em Ensino de Física, Instituto de Física da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos necessários à obtenção do Título de Mestre em Ensino de Física.

As leis de conservação podem ser vistas um modo óbvio de abordar vários problemas em física. No entanto, a maioria dos alunos tende a achar que as leis de conservação são um tanto quanto misteriosas, apresentando relutância em utilizá-las, a menos que seja pedido de forma explícita pelo instrutor. Assim, uma tarefa pedagógica importante é fornecer aos alunos um ambiente de aprendizagem onde eles apresentem as suas próprias ideias das leis de conservação. Nesta dissertação propomos tratar em particular o momento linear, como uma quantidade que se comporta como uma substância que flui de um corpo para outro, com o objetivo de facilitar a compreensão do aluno sobre o conceito de quantidade de movimento e a sua conservação. Esta abordagem, foi realizada de modo pioneiro pelo The Karlsruhe Physics Course (KPK) e difere da abordagem tradicional, onde inicialmente introduz-se o conceito de força e apenas muito depois o conceito de momento. Propomos, ao contrário do KPK, complementar a abordagem tradicional com uma visão mais geral das leis de conservação utilizando o ensino por analogias. Como resultado desta abordagem, a quantidade de movimento e sua conservação serão reinterpretados de modo complementar o seu caráter vetorial, fornecendo aos alunos modelos mentais alternativos. São apresentadas, também, a construção de uma mesa de

ar, sugestões de atividades experimentais com o uso de vídeo análises e a utilização de substâncias para explicar por analogias os resultados obtidos experimentalmente. São atividades experimentais que explicitam o tema, implementando as propostas levantadas pelo PCN+ em relação ao conteúdo e a formação do educando, no sentido de facilitar a compreensão do conceito de momento linear e a sua conservação

Palavras-chaves: massa, quantidade de movimento, colisões, conservação.

Sumário

1. Produto da Dissertação: Uma aula sobre Fluxo de Momento ou Fluxo da Quantidade de Movimento	5
1.1 Introduzir o conceito-alvo: quantidade de movimento	5
1.2 Sugerir o conceito análogo, lembrando aos alunos que estes sabem sobre o conceito: a quantidade de movimento como uma substância	7
1.3 Identificar as características relevantes entre os dois domínios:	16
1.4 Mapear as similaridades entre os dois conceitos;	17
1.5 Indicar onde a analogia é falha.	17
1.6 Esboçar as conclusões sobre o conceito-alvo.....	18
Referências Bibliográficas:	19

1. Produto da Dissertação: Uma aula sobre Fluxo de Momento ou Fluxo da Quantidade de Movimento

Vamos seguir o TWAS (Teaching With Analogies Strategy) visto no Capítulo 4.

Os pré-requisitos para esta aula são: cinemática, vetores e as Leis de Newton. As etapas deste método são:

- 1) Introduzir o conceito-alvo;
- 2) Sugerir o conceito análogo, lembrando aos alunos o que estes sabem sobre o conceito;
- 3) Identificar as características relevantes entre os dois domínios;
- 4) Mapear a similaridade entre os dois conceitos;
- 5) Indicar onde a analogia é falha.
- 6) Esboçar as conclusões sobre o conceito-alvo.

1.1 Introduzir o conceito-alvo: quantidade de movimento

Assim como um objeto em repouso possui inércia, os movimentos dos corpos têm inércia. Curiosamente, o movimento é um dos assuntos mais difíceis de ser tratar em Física, devido ao senso comum. Um trem em alta velocidade é difícil de ser parado. De fato, o trem em movimento está exibindo a sua inércia. Assim, podemos estender o conceito de inércia aos objetos em movimento, tendem a permanecer em movimento. Do mesmo modo, objetos em repouso, que tendem a permanecer em repouso e somente adquirir gradualmente velocidade se estiverem sujeitos a uma interação, através de uma força.

Um conceito importante nas leis do movimento é a quantidade de movimento de um corpo que se move. A palavra é comumente aplicada a um objeto que se move e que é difícil de ser parado. Quanto maior sua quantidade de movimento, maior será a

dificuldade de pará-lo. Nossa intuição nos diz que uma pedra de massa muito grande que rola em um declive acentuado pode adquirir uma grande quantidade de movimento e em consequência a pedra dificilmente pode ser parada. Por outro lado, uma pequena pedra rolando no mesmo declive, a partir da mesma altura, pode ser parada muito mais facilmente, devido ao fato de sua massa ser muito menor do que a da pedra grande.

O conceito físico de quantidade de movimento, \mathbf{Q} , uma grandeza vetorial, é definido em mecânica clássica como o produto da massa inercial, m , pela velocidade do objeto, \mathbf{v} , ou seja

$$\mathbf{Q} = m \cdot \mathbf{v} \quad (1.1)$$

Este conceito foi utilizado por Isaac Newton para formular as leis do movimento e desempenha um papel importante em Física. Como a velocidade de um objeto depende do referencial adotado, a quantidade de movimento também dependerá do referencial. Normalmente, adotamos como referencial a Terra, suposta ela mesma, com boa aproximação.

Outro conceito importante, relacionado com a quantidade de movimento é o conceito de impulso de uma força. Ao empurrar uma caixa, ou chutar uma bola, aplicamos uma força durante um determinado tempo. Este tempo é necessário para que se manifestem os efeitos da interação com o objeto em questão, ou seja, a mudança da velocidade do objeto. Assim, é útil introduzir uma grandeza que leve em conta a interação através da força aplicada e o intervalo de tempo durante o qual a interação ocorre.

Seja \mathbf{F} uma força externa constante que age num corpo durante um intervalo de tempo Δt . Definimos o impulso $\Delta \mathbf{Q}$ da força \mathbf{F} , no intervalo de tempo considerado, como sendo uma grandeza vetorial com a mesma direção e sentido de \mathbf{F} , cuja intensidade é dada por

$$\Delta \mathbf{Q} = \mathbf{F} \cdot \Delta t \quad (1.2)$$

O teorema do impulso: Considere um corpo de massa m em movimento retilíneo uniformemente acelerado, sob a ação de uma força externa resultante \mathbf{F} . Pela segunda Lei de Newton:

$$\mathbf{F} = m \cdot \mathbf{a} \quad (1.3)$$

Como o movimento é uniformemente acelerado:

$$\mathbf{a} = \frac{\Delta \mathbf{V}}{\Delta t} = \frac{\mathbf{V} - \mathbf{V}_0}{\Delta t} \quad (1.4)$$

Substituindo 1.4 em 1.3:

$$\mathbf{F} = m \cdot \frac{\Delta \mathbf{V}}{\Delta t} = m \cdot \left(\frac{\mathbf{V} - \mathbf{V}_0}{\Delta t} \right) \quad (1.5)$$

Ou ainda

$$\mathbf{F} \cdot \Delta t = \Delta \mathbf{Q} = m \cdot \mathbf{V} - m \cdot \mathbf{V}_0 = \mathbf{Q} - \mathbf{Q}_0 \quad (1.6)$$

Assim, o teorema do impulso afirma que o impulso da resultante das forças constantes que agem num corpo é igual à variação da sua quantidade de movimento num dado intervalo de tempo.

1.2 Sugerir o conceito análogo, lembrando aos alunos que estes sabem sobre o conceito: a quantidade de movimento como uma substância

É extremamente valioso para o ensino de física o fato que algumas grandezas, a princípio distintas, possam ser discutidas de formas iguais. Algumas grandezas físicas se comportam analogamente aos fluidos (líquidos e gases). São chamadas de quantidades de substância. Entre elas está a quantidade de movimento. A quantidade de movimento, Q ,

pode ser *imaginada* como um tipo de substância que flui de ou para um corpo. Uma indicação de que a quantidade de movimento se comporta como substância é o fato dela obedecer à equação da continuidade, expressa aqui por simplicidade como:

$$\frac{\Delta Q}{\Delta t} = F \quad (1.7)$$

Onde ΔQ é a variação da quantidade de movimento de um objeto sujeito a uma força externa F , num intervalo de tempo Δt . Esta equação é análoga a $\frac{\Delta q}{\Delta t} = I$, q é a carga elétrica e I a corrente elétrica. Em quaisquer dos casos, a equação da continuidade se aplica a uma dada região do espaço de volume V , limitado pela superfície S . A quantidade $\Delta Q/\Delta t$ representa a taxa de variação temporal da quantidade de movimento dentro da região. F_Q , a força externa aplicada, representa a intensidade de corrente de Q que atravessa a superfície S que limita a região de volume V . Assim, há duas causas para a mudança no valor de Q dentro do volume V : a criação ou destruição de Q dentro da região e uma corrente de Q através da superfície S que limita V .

A quantidade de movimento apenas pode alterar o seu valor na região V quando uma corrente de quantidade de movimento (força externa) flui através da superfície S . Assim, a quantidade de movimento é dita conservada, conforme ilustrado na Fig. 1.1.

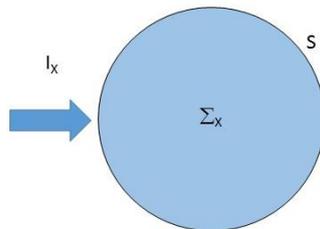


Fig.1.1 – Ilustração da equação da continuidade para uma região limitada pela superfície S . I_x representa a taxa de variação da quantidade X que flui para dentro (ou para fora) do volume definido pela superfície S . Σ_x representa todas as fontes (ou sorvedouros) de X dentro de S .

Sabemos que as transições dos pensamentos científicos geram conflitos com as antigas ideias, as construções dos conceitos físicos são oriundas de uma luta por conceitos novos. Existem razões e dificuldades que forçam a modificar importantes conceitos, devemos não só compreender os caminhos iniciais, mas as conclusões que estas modificações nos levam, não foi diferente com o conceito que temos sobre a quantidade de movimento. Um corpo em movimento possui uma quantidade de movimento, a quantidade de movimento sofre variações desde que ações externas atuem sobre essa massa. Podemos questionar de que forma o corpo adquiriu essa quantidade de movimento ou de que forma essas ações podem variar essa quantidade de movimento.

Se olharmos para o estado do carrinho em repouso, vemos que ação das forças externas que atuam sobre o ele se encontra em equilíbrio e a quantidade de movimento é nula, conforme a Figura 1.2 abaixo:

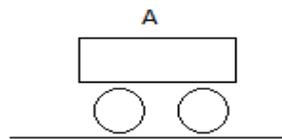


Figura 1.2: Carrinho A em repouso.

Quando uma força externa F passa a atuar sobre o carrinho A, este começa a adquirir quantidade de movimento e a mesma começa a aumentar devido à ação de F , conforme a figura 1.3:

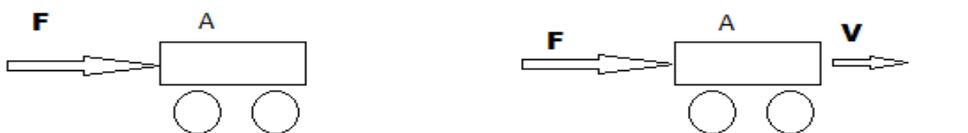


Figura 1.3: A força F atuando sobre o carrinho e alterando a quantidade de movimento do carrinho devido a sua atuação.

Vemos que o carrinho A adquire quantidade de movimento quando a força \mathbf{F} passa a atuar sobre o carrinho. Da mesma forma, uma força externa pode variar a quantidade de movimento de um corpo se encontrar em movimento. Vejamos a figura.1.4:

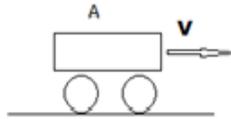


Figura: 1.4: Carrinho A com velocidade constante, logo com quantidade de movimento constante.

O carrinho A agora se apresenta com velocidade constante \mathbf{V} e as forças que atuam sobre o carrinho se equilibram. Em consequência, a sua quantidade de movimento é constante. Sob a ação da força externa \mathbf{F} , ocorrerá uma alteração em sua velocidade. Conforme ilustra a fig. 1.5:



Figura 1.5: O carrinho A altera a sua velocidade de V para V' devido a ação da força F sobre o mesmo.

Em consequência da ação da força \mathbf{F} , a sua quantidade de movimento sofrerá uma variação. Logo, a velocidade do carrinho A também sofrerá uma alteração de \mathbf{V} para \mathbf{V}' . Para o caso das colisões, no momento em que as mesmas ocorrem, a ação da força entre dois carrinhos fará o seu papel de alterar a velocidade dos dois carrinhos e por conseguinte a sua quantidade de movimento.

Usando uma analogia com corrente elétrica, $i = \frac{\Delta q}{\Delta t}$, por exemplo, poderíamos enxergar a alteração dessa quantidade de movimento de uma outra forma: se considerarmos que a força \mathbf{F} faz com que a quantidade de movimento se altere pela

entrada e saída dessa quantidade como um *fluxo de momento*, $F = \frac{\Delta Q}{\Delta t}$. Abordar essa alteração por um fluxo de momento se daria simplesmente por analogias, assunto que foi abordado no capítulo 4. Essa abordagem nos facilitaria em várias ocasiões, e também ajudaria nossos alunos a uma compreensão do assunto proposto para esta dissertação.

Friedrich Herrmann e Georg Job em *The Karlsruhe Physics Course* [Herrmam,2006], propõem tratar a perda de quantidade de movimento pela saída de um *fluxo* e o ganho da quantidade de movimento pela entrada de um fluxo que ocorre nos corpos, como descrito por eles. Veja o trecho abaixo:

“Uma comparação da quantidade movimento com a água é útil aqui também. Um veículo com rolamentos ruins que rola até parar, significa que seu impulso está indo para a Terra, em analogia a um balde furado. A água gradualmente escoo para o ambiente. Rolamentos ruins, ou seja, fricção, representam um vazamento de impulso. Um veículo com bons rolamentos é comparável a um balde selado”
[Herrmam,2006]

O carrinho A se encontra em repouso. Ao ser empurrado sobre a ação de um bastão, este começa a adquirir quantidade de movimento pelo *fluxo* da quantidade de movimento que passa a “entrar” no mesmo. Este fluxo que é oriundo da Terra, conforme ilustra a fig. 1.6:

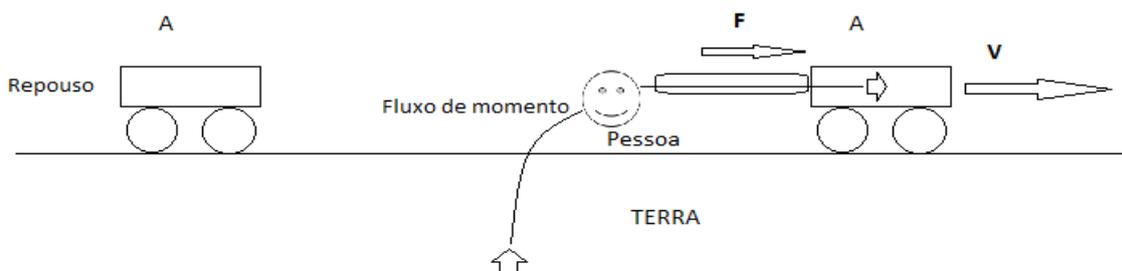


Figura 1.6: O carrinho A se encontra em repouso, ao sofrer a ação da força F ele começa a adquirir quantidade de movimento pelo fluxo de momento.

Vemos que o fluxo do momento flui da Terra, passando pela pessoa e pelo bastão até chegar ao carrinho A.

Quando o contato entre o bastão e o carrinho é desfeito, o carrinho A possui velocidade V . Ao passar por uma região onde o atrito é suficientemente relevante, ocorrerá a saída do momento devido à ação da força de atrito sobre o carrinho, conforme ilustra a fig. 1.7:

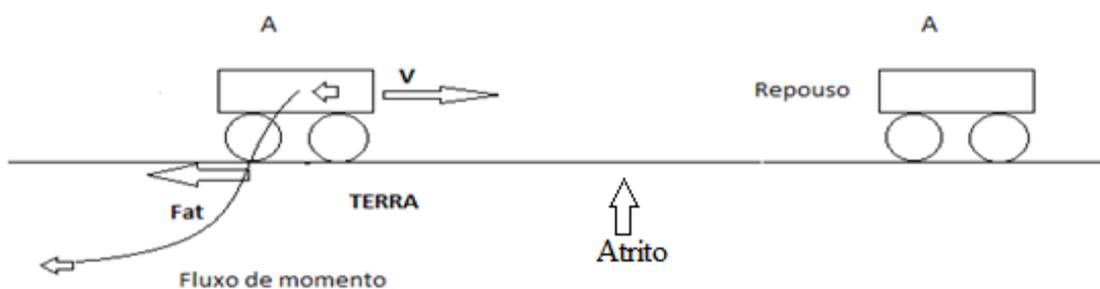


Figura 1.7: Com a ação da força de atrito o fluxo de momento flui do carrinho para a terra.

Em consequência da perda total da sua quantidade de movimento, o carrinho ficará no estado de repouso.

Abordaremos a situação em que o carrinho consegue manter a quantidade de movimento constante por ele adquirida. Poderemos entender o que acontece com o fluxo de momento quando há um equilíbrio entre as forças que atuam sobre o carrinho A. Nesse caso, a entrada e a saída do fluxo de momento são dadas pela atuação das forças que agem sobre o carrinho A, como podemos ver a ilustração na figura 1.7. Como há um equilíbrio entre as forças F e a F_{at} , a entrada e a saída de fluxos são iguais, mantendo a quantidade de movimento do carrinho A constante, conforme ilustra a figura 1.8 abaixo:

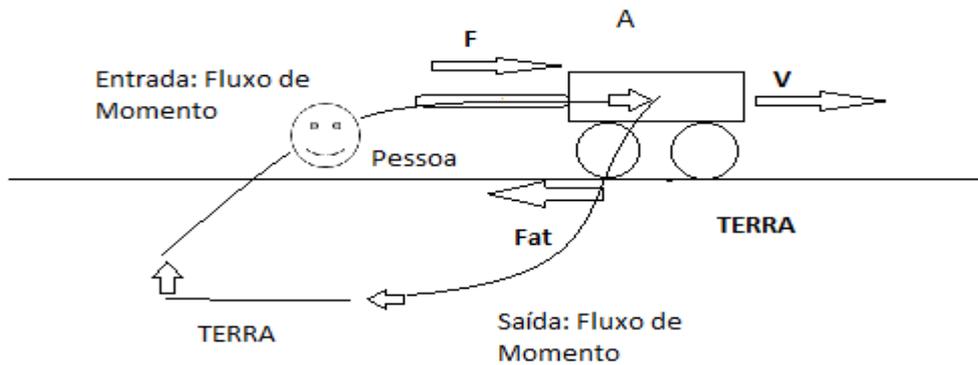


Figura 1.8: Entrada e saída de fluxo de momento, pelo equilíbrio das forças que atuam sobre a carrinho A.

O tratamento dado à quantidade de movimento como fluxo que entra ou escoou dos corpos em sua aquisição ou perda pode auxiliar o educando no entendimento do conteúdo. O que não podemos esquecer que é essa abordagem é aplicada pelo uso de analogias, em que o aumento da quantidade de movimento é dado pelo escoamento de seu fluxo para dentro do corpo e, por conseguinte, a sua perda dada pelo escoamento para fora do corpo.

A definição da intensidade desse fluxo que escoou para dentro e para fora do corpo dividido pelo intervalo de tempo do escoamento pode ser descrita pela equação 1.8:

$$F = \frac{\Delta Q}{\Delta t} \quad (1.8)$$

O fluxo é abordado de forma diferente. Atribuímos a intensidade da força como a quantidade de movimento que entra ou sai do corpo por intervalo de tempo.

Abordando a quantidade de movimento nas colisões como fluxo:

Como foi mencionado no item anterior deste capítulo, a aquisição ou perda da quantidade de movimento foi abordada como um fluxo que entra ou escoou dos corpos. O que iremos abordar neste item é como se daria esse escoamento da quantidade de

movimento através das colisões, já que a nossa proposta é que as colisões ocorram sem atrito com a superfície, de forma que os corpos não estejam em contato com a superfície. Em consequência, não teremos o escoamento do fluxo da Terra para os corpos e vice-versa. A figura 1.9 nos mostra aquisição da quantidade de movimento pela massa A: uma pessoa aplica uma força sobre a massa e o fluxo de momento flui da Terra para o bloco, vemos que a quantidade adquirida não tem escoamento para a Terra; logo, há um ganho dessa quantidade enquanto a pessoa age com uma força \mathbf{F} sobre a massa.

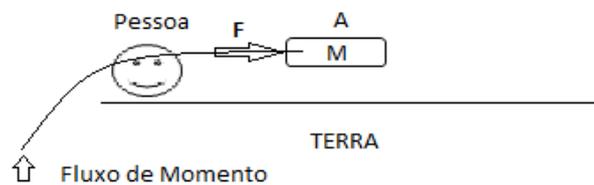


Figura 1.9: Aquisição da quantidade de movimento pela massa A.

A figura 1.9 nos mostra como ocorre a aquisição da quantidade de movimento pela massa A. O que abordaremos no momento da colisão ocorra um fluxo dessa quantidade de uma massa para outra. O que Herrmann menciona é que esta quantidade flui do corpo que possui maior velocidade para o corpo de menor velocidade.

“... O impulso flui a partir do corpo com a maior velocidade (o carro) para dentro do corpo com a velocidade mais baixa (para o chão que tem uma velocidade de 0 km / h). Sempre que o impulso deve fluir na direção oposta, ou seja, a partir de um corpo com velocidade inferior a um corpo com uma velocidade mais elevada, uma bomba de impulso é necessário.” [Herrmam,2006]

A figura 1.10 ilustra uma colisão em que o fluxo da quantidade de movimento ocorre, do corpo de maior velocidade para o corpo em repouso (velocidade inicial nula).

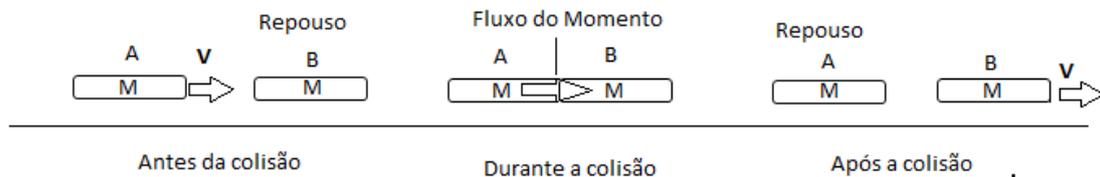


Figura 1.10: Durante a colisão há um escoamento total da quantidade de movimento da massa A para a massa B.

Baseado na fluidez da quantidade de movimento do corpo que possui maior velocidade para o corpo de menor velocidade, o que podemos questionar é o caso em que os corpos possuem a mesma velocidade. Neste caso, o escoamento ocorrerá nos dois sentidos em quantidades iguais; em consequência, os corpos sairão com velocidades iguais às iniciais. Ressaltando que para este caso as massas de A e B são iguais, vejamos a figura 1.11:

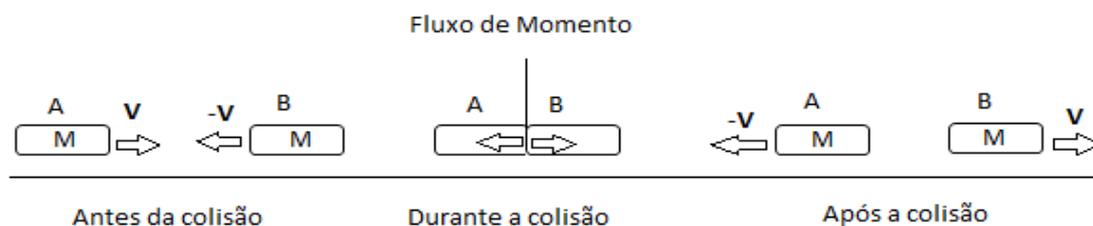


Figura 1.11: Durante a colisão o fluxo de momento ocorre nos dois sentidos.

No instante da colisão há um escoamento do fluxo de momento nos dois sentidos, ocorrendo uma troca das quantidades de movimento entre as duas massas.

Para a condição das massas serem diferentes, o fluxo da quantidade de movimento também ocorrerá do corpo que possui maior velocidade para o corpo que

possui menor velocidade, mesmo que a sua massa seja menor valor. A fig.1.12 ilustra o que acabamos de ressaltar.

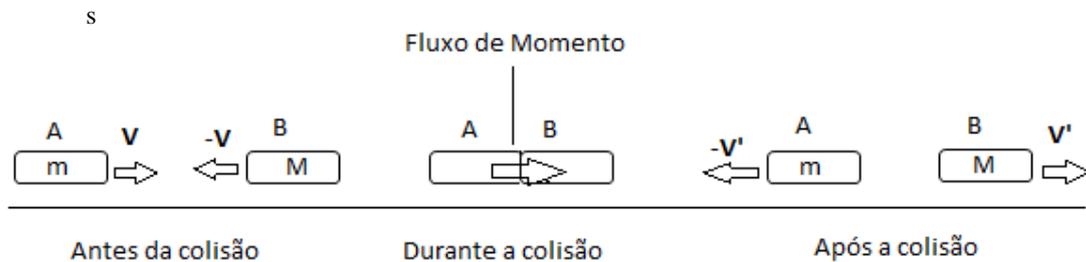


Figura 1.12: Mostra a colisão entre corpos de massas diferentes e o fluxo de quantidade de movimento fluindo do corpo que possui velocidade maior para o corpo que possui velocidade menor $|V| > |-V|$ e $M > m$.

Na condição em que as massas são diferentes $M > m$ e $|V| > |-V|$ o fluxo de momento ocorrerá do corpo que possui maior velocidade para o de velocidade menor, mesmo que a quantidade de movimento da massa maior, seja maior. Pois o sentido das velocidades depois da colisão não influenciará no escoamento do fluxo.

1.3 Identificar as características relevantes entre os dois domínios:

Por obedecer à equação da continuidade, a quantidade de movimento possui algumas propriedades que fazem ser fácil de lidar com ela:

- I) O valor da quantidade de movimento refere-se a um corpo;
- II) A quantidade de movimento possui outra grandeza associada a ela, a força externa \mathbf{F} , que pode ser interpretada como uma corrente de quantidade de movimento;

- III) Assim como qualquer fluido, a quantidade de movimento é aditiva, ou seja, se um corpo possui quantidade de movimento Q_0 e adicionarmos uma quantidade de movimento ΔQ , a quantidade de movimento final será $Q = Q_0 + \Delta Q$
- IV) As respectivas correntes, ou forças externas aplicadas, também são aditivas, ou seja, obedecem ao princípio da superposição.

1.4 Mapear as similaridades entre os dois conceitos;

As similaridades entre a quantidade de movimento e um fluido são:

- I) Ambas grandezas se conservam (obedecem a uma equação da continuidade);
- II) Passam de um corpo para outro;
- III) São aditivas; o uso da adição pode ser usada quando o caráter vetorial não é necessário, ou seja, em colisões em uma dimensão.
- IV) Aumentam ou diminuem de acordo com as suas respectivas correntes;

1.5 Indicar onde a analogia é falha.

Claramente a quantidade de movimento *não* é um fluido, embora, como vimos, possa ser *imaginado* como um fluido. Os pontos nos quais a analogia falha são:

Fluido	Quantidade de movimento
Quantidade escalar	Quantidade vetorial
É paupável (material)	É imaterial

No capítulo 7, os experimentos 5 e 6 são dois exemplos em que a analogia proposta mostra as suas limitações. No experimento 5, a situação proposta só é solucionada quando apresentamos o seu carácter vetorial. No experimento 6, por ser uma colisão bidimensional a proposta é incompatível, pois, mostram o carácter vetorial da quantidade de movimento e suas decomposições.

. A analogia apresentada também apresenta limitações para os casos dos movimentos circulares.

1.6 Esboçar as conclusões sobre o conceito-alvo.

A quantidade de movimento é definida como o produto da massa pela velocidade de um objeto, $Q = m.v$. A partir dessa definição, vemos que um corpo pode possuir uma grande quantidade de movimento se sua massa for muito grande e/ou se sua velocidade também for muito grande.

Se desejamos aumentar a quantidade de movimento de um corpo, devemos aplicar uma força externa durante um período de tempo. A quantidade de movimento é aditiva.

Referências Bibliográficas:

[Glynn, 2007] Glynn, Shawn. The Teaching with Analogies Model – Building conceptual bridges with mental models, 2007.

[Herrmann,2006] Herrmann, Friedrich; Job, Georg - The Karlsruhe Physics Course - A Physics Text Book for the Lower Secondary School - Volume 1, Maio - 2006