Revista Brasileira de Ensino de Física, v. 33, n. 4, 4304 (2011)
www.sbfisica.org.br

Reavaliação e rememoração dos conceitos da mecânica geral com análises geométricas e/ou gráficas: linha de ação de uma força. Parte I

(Re-evaluation and recall of concepts of the general mechanics with geometric and/or graphic analysis: line of action of a force. Part I)

P.F. Barbieri[1]

Faculdade de Tecnologia de Mogi Mirim, Mogi Mirim, SP, Brazil
Recebido em 8/11/2010; Aceito em 29/8/2011; Publicado em 29/11/2011

Os conceitos de linha de ação de uma força são fundamentais para o estudo de sistemas mecânicos estáticos e dinâmicos. Contudo, esse é um conceito pouco explorado nos livros textos tanto de ensino superior como de ensino médio, quando muito, apenas mencionado. O presente trabalho apresenta uma rememoração dos conceitos das linhas de ação para pares de forças e propõe um método geométrico alternativo para a determinação do ponto de atuação da força resultante, enfatizando sua direção e sentido. Tal método foi denominado de "método das componentes paralelas".
Palavras-chave: linha de ação, máquina simples, método gráfico vetorial.

The concepts of line of action of a force are fundamental to the study static and dynamic mechanical systems. However, this concept is a little explored in textbooks of both graduate school as a high school, at most, only mentioned. This paper presents a recall to concepts about lines of action for force pairs and proposes an alternative geometric method for determining the point of resultant force action, emphasizing its direction and sense. This method was called "parallel components method".
Keywords: line of action, simple machines, vectorial graphic method.

1. Introdução

Muitos livros de física, sobre o tema mecânica, são utilizados no denominado ciclo básico de graduação atendendo as diversas áreas do conhecimento. Dos vários livros vistoriados para este trabalho, que são amplamente usados nas universidades e faculdades do Brasil, muitos aparentam ter como propósito a idéia de um livro de física geral. Isso para que atenda as diversas áreas da ciência, ou mesmo, cursos estritamente dirigidos, que exijam apenas os conceitos necessários das ciências físicas [1–7]. Outros livros, no entanto bastante completos, deixam escapar alguns conceitos [8]. O propósito dos livros, pelo que tudo indica, tem na sua origem a objetividade dos assuntos a serem abordados. Todavia, conduz a omissão de alguns assuntos considerados fundamentais para o estudo da mecânica. São exemplos o conceito de linha de ação e o tema máquinas simples. Os livros seguem um mesmo padrão e, neste sentido, as faltas de um aparecem no outro. O conceito de linha de ação aparece pouco ou em apenas um momento em alguns livros. Não recebe uma atenção enfática. A omissão ou exclusão de algum assunto em específico pode aparecer ao custo da simplicidade. Talvez, pela mera razão de não incorrer na prolixidade para o propósito em questão.

De modo geral, o estudo da mecânica ocorre com início da mecânica da partícula e depois a mecânica dos corpos rígidos ou sistemas de partículas. Poucos são os autores que citam o conceito da linha de ação de uma força [9, 10] dentro desses contextos e, ainda, há aqueles cuja citação é apenas um complemento para uma explicação ocasional, onde o conceito passa quase despercebido [1, 2, 11]. O conceito de linha de ação de uma força precede outros, como centro de força ou ponto de atuação da força resultante, princípio da transmissibilidade e vetor "deslizante", além de reforçar o propósito do tratamento vetorial. Há no entanto outros livros, por exemplo, de ensino secundarista,[2] que trazem a aplicação do conceito da linha de ação de uma força, mas não deixam claro seu significado [12].

O autor deste trabalho acredita que um graduando

[1]E-mail: paulo.barbieri@fatecmm.edu.br.

[2]A denominação de ensino secundarista é pretendida aqui porque os vários livros vistoriados correspondem à décadas atrás e, junto com os livros atuais, dizem respeito às várias classificações na formação do estudante.

que depois irá estudar mecânica clássica, estática, resistência dos materiais, mecânica dos sólidos e mecânica dos fluidos, terá os conceitos bem mais fundamentados se os conceitos de linha de ação de uma força forem, em algum momento, trabalhados.

Considerando livros secundaristas e passando pelos livros de física geral do ensino superior até os mais avançados para cursos de graduação, é observado que um fica na dependência do outro para explorar a questão da linha de ação. Acaba que nenhum deles trabalha adequadamente o assunto. Alguns autores, tanto de ensino superior ou secundarista, mencionam esse conceito dentro de um determinado contexto. Por exemplo, quando trabalham torque e/ou momento angular [9–11, 13–16]. Outros livros, utilizados em disciplinas mais graduadas que abrigam alunos que já tenham cursado a disciplina de mecânica geral básica ou física I, consideram como conceito já ministrado [17–20].

O problema, pelo que tudo indica, é que os livros de ensino superior tratam o assunto linha de ação como básico e por isso são sucintos nas suas exposições, quando as fazem. Deste modo, fica uma lacuna a ser preenchida, pois de um lado os livros básicos não abordam o assunto e, do outro, os livros mais avançados consideram sucintamente o tema por se tratar de caráter básico. Se para os livros de graduação esse é um assunto que, talvez, não deva compor seu conteúdo, os livros do ensino secundarista também não creditam a devida importância [13, 15], exceto livros de edições de décadas atrás [12, 21].

O propósito deste trabalho é chamar a atenção para o conceito de linha de ação de uma força e suas conseqüências nos vários contextos da mecânica. A razão disto é porque o tema é pouco explorado, mas de extrema utilidade na compreensão dos problemas da mecânica. Ainda, o trabalho propõe uma alternativa simples para determinação do ponto de atuação da força resultante. Evidentemente, as considerações são de sistemas de forças que não são concentradas em um ponto material. O método é parcialmente diferente dos métodos que foram analisados e encontrados em literaturas de outras épocas.

2. Revisão da literatura e contextualização do conceito da linha de ação de uma força

Os livros analisados para a composição deste trabalho consistem de um apanhado geral de alguns exemplares do nível escolar secundarista desde a década de 1950 a 2010 e nível superior desde as décadas de 1980 a 2010. Ao analisar esses livros, percebe-se que ao longo do tempo foi sendo colocado de lado um trabalho mais detalhado do conceito da linha de ação de uma força. Nesta seção a proposta é definir e mostrar a importância desse conceito.

Como início de abordagem o desenvolvimento segue pela própria definição encontrada em alguns dos livros analisados. De acordo com as Refs. [5] e [22], linha de ação de uma força pode ser definida como:

> "... a linha ao longo do qual o vetor força se encontra";
>
> "... a linha reta infinita ao longo do qual a força atua".

Em alguns casos essa linha pode ser entendida como "suporte" de atuação de uma força. Por exemplo, uma corda, uma barra, um fio, etc.; a força é então dirigida ao longo desse suporte [23]. Ainda, pode-se dizer que linha de ação de uma força é aquela que define o eixo do vetor força ou a linha retilínea onde ele se assenta (Fig. 1).

Uma vez definido linha de ação outros conceitos podem ser apontados. Inicialmente isso pode ser feito com a classificação das forças quanto a sua disposição em um diagrama de forças. Assim, forças colineares são aquelas que têm em comum a mesma linha de ação (forças **F** e **T** na Fig. 1), podendo ou não os vetores forças ter o mesmo sentido. Forças paralelas ou antiparalelas são definidas como aquelas cujas linhas de ação nunca se interceptam. Forças concorrentes são aquelas cujas linhas de ação se interceptam em algum ponto (forças **F** e **Q**, forças **T** e **Q** na Fig. 1).

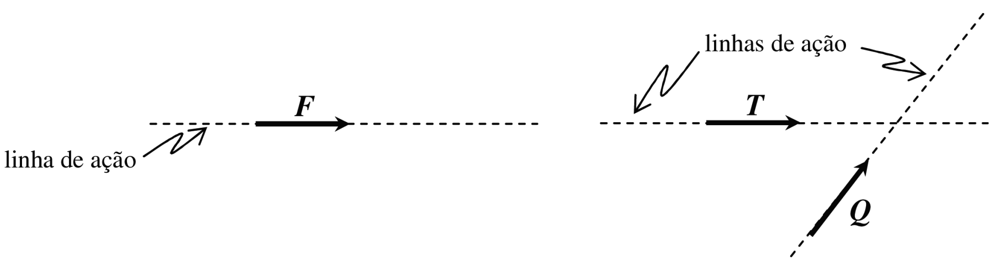


Figura 1 - Ilustração dos vetores força **F**, **T** e **Q** e suas respectivas linhas de ação. **F** e **T** colineares, e os pares **T** e **Q**, **F** e **Q** são concorrentes.

A linha de ação permite também reforçar os conceitos que dizem respeito ao equilíbrio estático. Em uma situação de equilíbrio estável o ponto de apoio está acima do centro de gravidade e a linha de ação da força peso não necessita passar pelo ponto de apoio (ver Fig. 2-a), pois retornará a posição inicial. A posição de perfeita estabilidade, nesse caso, é quando a linha de ação da força peso passar pelo ponto de apoio. Em um sistema instável, o ponto de apoio estará abaixo do centro de gravidade, por definição. Mas, se a linha de ação da força peso passar pelo ponto de apoio e o corpo não sofrer perturbação (posição reta), configura um equilíbrio estável para um corpo rígido. Efetivamente, será equilíbrio instável, se a linha de ação do peso não passar pelo ponto de apoio, pois não há necessidade de qualquer perturbação para o corpo sair de sua posição inicial (ver Fig. 2-b posição inclinada). As linhas de ação são costumeiramente aplicadas na determinação do metacentro para determinação de situações de equilíbrio em embarcações [12, 20].

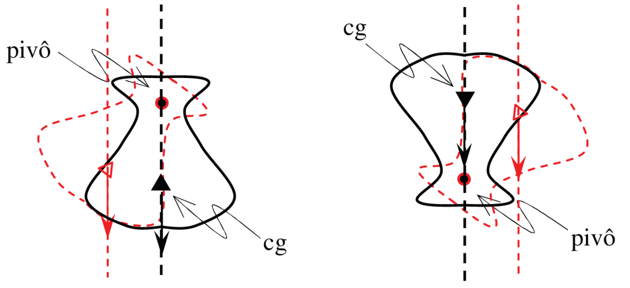


Figura 2 - Contorno em preto: posição reta; contorno em vermelho: posição inclinada. (a) Equilíbrio estável: centro de gravidade (cg) abaixo do ponto de apoio (pivô) e (b) equilíbrio instável: centro de gravidade (cg) acima do ponto de apoio (pivô). As linhas retilíneas tracejadas são as linhas de ação da força peso.

Em estudos de força central, particularmente a força centrípeta, a linha de ação devido a essa força obrigatoriamente deve passar pelo centro da circunferência descrita como trajetória do corpo. Para que o movimento circular se conserve é, então, necessário que a linha de ação da força não deixe de passar pelo centro da circunferência.

Fazendo uso da terceira lei de Newton, não a restringindo somente para a mecânica, as linhas de ação permitem definir a forma forte e fraca, caso elas tenham a mesma direção ou não [17, 24].

No estudo de máquinas, um dos temas motivadores para o desenvolvimento da mecânica, o conceito da linha de ação é fundamental para uma descrição e compreensão mais rigorosa do assunto [25]. De maneira sintética, as máquinas usadas na transformação e transmissão de movimentos são constituídas basicamente de hastes e rodas. Conhecer o ponto, a direção e a intensidade onde a força resultante atua para produzir esse movimento é primordial na concepção do equipamento. A determinação desse ponto é realizada com o conceito de linha de ação das forças.

No presente artigo, inicialmente é mostrado um método geométrico que a literatura apresenta para a determinação do ponto da força resultante. Depois, em secção posterior, está mostrado um método geométrico parcialmente diferente dos observados na literatura. Ambos os métodos fazem uso das linhas de ação das forças.

3. Linhas de ação de forças e o ponto de atuação da força resultante

Nesta seção será apresentado o método utilizado em alguns livros que exploram mais detalhadamente o assunto [12, 21]. Para o movimento de translado ou de rotação o conhecimento do ponto de atuação da força é fundamental. Normalmente, se o corpo é livre o ponto considerado onde as forças se concentram é o centro de gravidade. Um corpo livre, para as considerações da aplicação da mecânica é uma condição apenas para assuntos introdutórios. Na realidade, a menos que o corpo esteja vagando no vácuo absoluto, ele sempre interagirá em contato e terá, no mínimo, um ponto de contato. Sendo assim podemos considerar dois pontos para um corpo rígido, um devido ao ponto de contato e outro no centro de gravidade.

A aplicação das linhas de ação das forças tem como propósito simplificar a análise do sistema envolvido. Essa simplificação trata de reduzir o sistema de forças a uma única força resultante. Para isso, é feito o prolongamento da linha de ação de cada força, onde elas estão representadas. Em seguida, é aplicado o princípio da transmissibilidade. Depois, é aplicado o princípio da superposição das forças. Então, a força resultante é determinada. Essa estratégia para resolução de problemas de estática é rotineiramente aplicada em literatura mais específica e avançada [18, 22]. Exemplo disso é quando o ponto é um fulcro ou pivô.

Em casos onde as forças possuem pontos distintos de atuação, o princípio da superposição ainda é válido para determinar a direção, sentido e módulo da resultante. Contudo, não permite identificar qual é o ponto sobre o corpo no qual essa resultante situa e possa ser representada.

Em casos mais gerais, onde são inúmeras as forças que atuam sobre o corpo, é interessante utilizar o princípio da superposição para os pontos onde determinadas forças se concentram (caso do fulcro). Então, aos pares, ir encontrando os pontos de atuação das resultantes "secundárias" e, aos pares das secundárias, determinar a resultante final. Sendo assim, as considerações a serem feitas serão sobre pares de força.

3.1. Forças paralelas e antiparalelas

O método descrito abaixo é um método gráfico e é válido independente do ângulo formado entre os vetores força com a linha que une os pontos de aplicação dessas forças. O procedimento é válido desde que sejam resguardadas as proporções dos vetores relativos às suas intensidades. O método consiste em *sobrepor cada vetor sobre a linha de ação do outro, invertendo o sentido de qualquer um deles.* A Fig. 3 ilustra o método. O ponto de atuação da força resultante é o ponto de intersecção c. Essa intersecção é resultado da linha que une as forças (linha contínua) com a linha que liga as pontas[3] dos vetores transladados (linha tracejada).

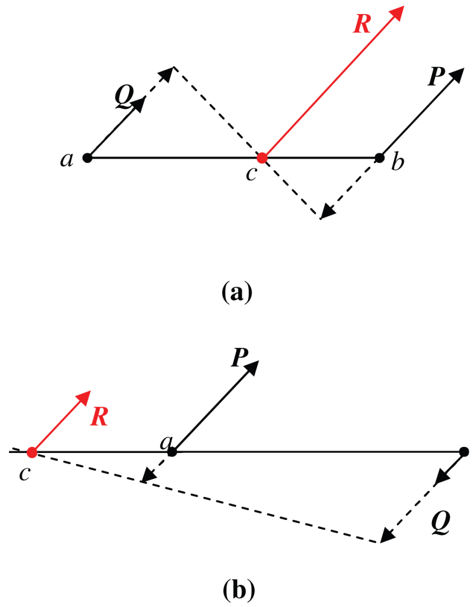


Figura 3 - (a) Forças paralelas **P** e **Q**; (b) forças antiparalelas **P** e **Q**. As linhas tracejadas são as aplicações do método gráfico. Os pontos a e b são os pontos de aplicação das forças e o ponto c é o ponto onde é representado o vetor da força resultante **r**.

A inversão de um vetor exatamente no ponto do outro é para mostrar que o ponto c é o ponto onde o torque é nulo, ou seja, a força resultante atuando nele não produziria movimento de rotação algum. Assim, o ponto c representa um fulcro, pivô ou um eixo de rotação. No caso da Fig. 3-b, caso as forças fossem nas bordas de um corpo, o ponto estaria fora da linha que une as forças e, consequentemente, fora dele. Isso indicaria que o corpo rotacionaria, inevitavelmente. Se, por ventura, existisse um eixo de rotação, então o torque resultante seria dado por $\mathbf{r} \times \mathbf{r}$, onde $\mathbf{r}$ é definido como o vetor distância desde o eixo de rotação até o ponto c. Esse suposto eixo de rotação se encontraria alinhado com os pontos a e b.

3.2. Forças concorrentes

A Fig. 4 ilustra o método que também é um método gráfico e independente do ângulo formado entre os vetores força com a linha que une os pontos de aplicação dessas forças. Nessas situações, as linhas de ação são utilizadas para encontrar o ponto em comum dos vetores e, em seguida, realizar a soma vetorial. Nesse caso, aplica-se o princípio da transmissibilidade. Esse princípio diz que a força é a mesma em qualquer ponto sobre sua linha de ação. Da soma vetorial são determinados direção, sentido e intensidade da força resultante. Para encontrar o ponto de atuação da força resultante, aplica-se novamente o princípio da transmissibilidade sobre a resultante. Assim, a intersecção da linha de ação da resultante com a linha que une os pontos de atuação das forças concorrentes define o ponto de atuação da força resultante. A idéia de torque nulo no ponto c é a mesma que vista para a Fig. 3.

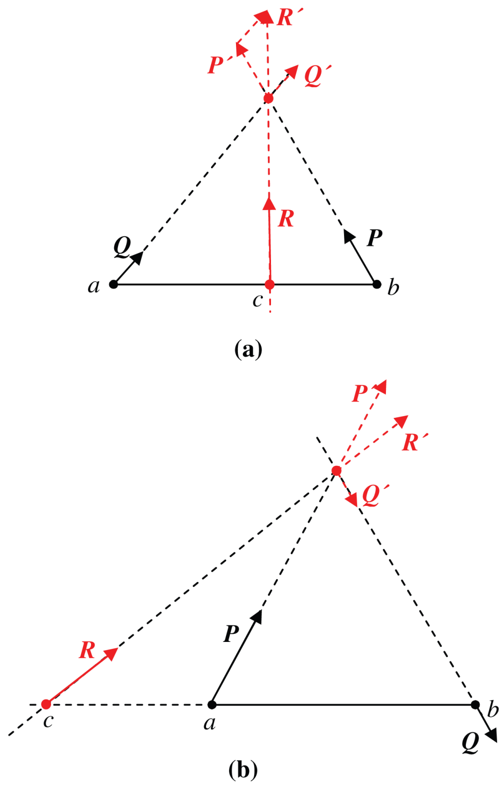


Figura 4 - (a) Forças concorrentes de mesmo hemisfério e (b) forças concorrentes de hemisférios opostos. Os pontos a e b são os pontos de aplicação das forças e o ponto c é o ponto onde é representado o vetor da força resultante **r**.

3.3. Método das componentes paralelas

A descrição que é proposta neste trabalho com esse método é a concepção dos dois métodos apresentados acima, mas realizado de uma única maneira pelas suas componentes. A visualização das componentes permite uma análise mais rápida do sistema em uma situação de equilíbrio (condição de análise), pois reduz o sistema à alavanca simples de forças ortogonais.

Independente de como é a configuração do par de forças, define-se o plano cartesiano com o eixo x coincidindo com a linha que une os pontos onde as forças

[3] O vetor representado graficamente por seta recebe as denominações cauda e ponta para sua origem e seu final, respectivamente.

são aplicadas e, então, aplica-se a decomposição vetorial nos eixos, como ilustra a Fig. 5. A atenção para aplicação do método é de que a componente y de cada força seja transladada sobre o ponto da outra força. Inverte-se o sentido de uma das componentes transladadas e traça-se uma linha de ponta a ponta dessas componentes. O ponto de intersecção da linha traçada com a linha que une os pontos das forças é o ponto de atuação da força resultante. Sobre o ponto de ação da força resultante realiza-se a soma vetorial das forças (ou a soma de todas a componentes originais) para determinar o vetor resultante **R**, como mostra a Fig. 5.

Deve ser notado que o ponto sempre se localizará ao lado da maior força nos casos em que fique fora da região entre as forças e, evidentemente, próximo à maior quando cair na região entre elas. Pode-se encontrar uma particularidade para os casos em que o sistema for de pares de forças paralelas ou concorrentes de mesmo hemisfério. Esses são casos como mostrado nas Figs. 3-a e 4-a onde a força resultante se encontra entre as forças aplicadas. A determinação do ponto onde o torque é nulo torna-se simples, uma vez que a razão entre as forças (ou componentes verticais delas) é o inverso da razão entre os braços. Pois, se $\mathbf{F}_{1y}\mathbf{r}_1 = \mathbf{F}_{2y}\mathbf{r}_2$ então $\frac{\mathbf{F}_{1y}}{\mathbf{F}_{2y}} = \frac{\mathbf{r}_2}{\mathbf{r}_1} = n$, onde n é uma constante que estabelece a proporção. Portanto, nesses casos particulares, torna-se simples encontrar o ponto de atuação da força resultante sabendo a razão n entre as forças (ou suas componentes) e a distância d entre seus pontos de aplicação, sendo $d = r_1 + r_2$.

4. Aplicações das linhas de ação com o método das componentes paralelas

4.1. Sistemas estáticos

Em sistemas estáticos como os mostrados na Fig. 6 (no plano) as linhas de ação das forças são usadas para determinar a força resultante e sua orientação. De uma análise rápida e visual da Fig. 6-a, o ideal é que a resultante das forças seja sobre o eixo x, com componentes se equilibrando em y e outras se somando em x. Isso para que os esforços sobre os parafusos maiores (de eixos paralelos com o eixo x) sejam iguais. No caso da Fig. 6-b, como será visto, a orientação do vetor força resultante é de um ângulo pouco menor que θ mostrado na figura.

A Fig. 7 mostra claramente a intersecção das linhas de ação onde seria representado o vetor resultante das forças para a situação (a). Mas, não necessariamente poderia ser assim. Basta imaginar que o ângulo seja menor (ou maior) que o apresentado na figura para qualquer uma das forças.

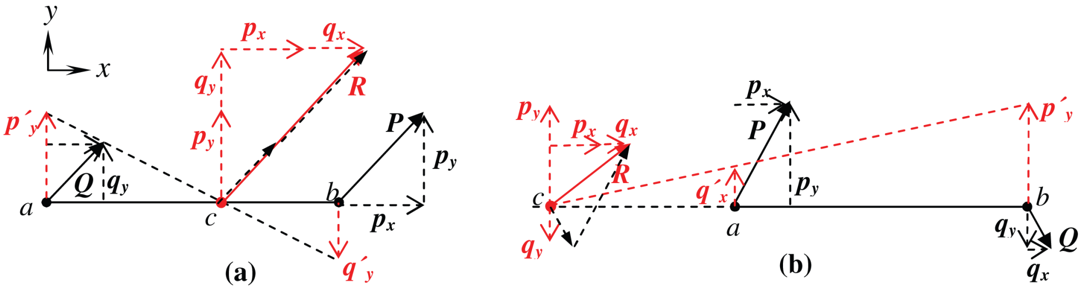
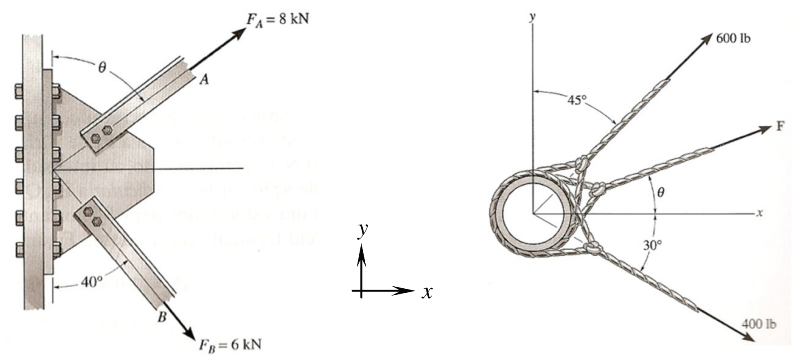


Figura 5 - (a) Forças paralelas e (b) forças concorrentes de hemisférios opostos. Os pontos a e b são os pontos de aplicação das forças e o ponto c é o ponto onde é representado o vetor da força resultante **r**. As linhas tracejadas ilustram o método. No ponto de atuação da força resultante o vetor resultante pode ser encontrado pelas componentes (vetores tracejados vermelhos) ou pelos vetores originais (vetores tracejados pretos). As configurações das forças em (a) e (b) são as mesmas que na Fig. 3-a e Fig. 4-b, respectivamente.



(a) (b)

Figura 6 - Esquemas de sistemas estáticos para a determinação da força resultante [18]. A direção e sentido da força resultante são determinados pelos prolongamentos das linhas de ação das forças. O ponto de intersecção dessas linhas, pelo princípio da transmissibilidade, é o ponto onde a soma vetorial é realizada.

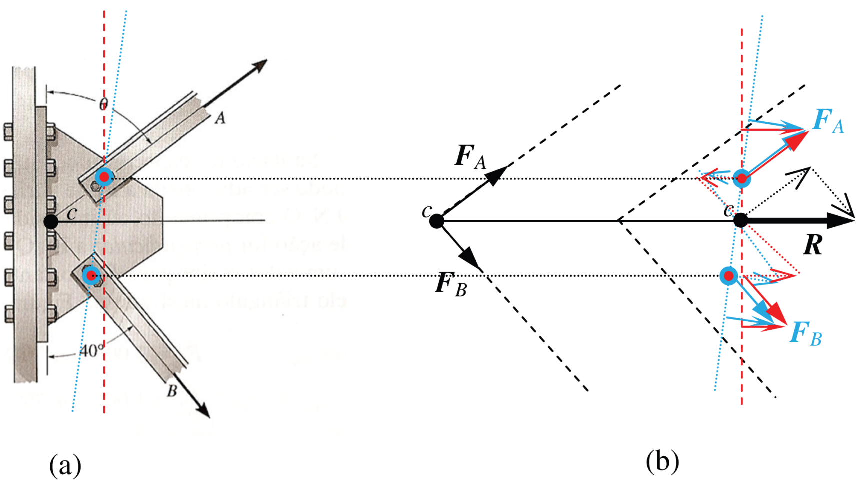


Figura 7 - Aplicação do método das componentes paralelas em um sistema de estrutura rígida [18]. (a) As linhas descontínuas azul e vermelho ilustram duas situações e são posicionadas nos pontos onde há o esforço sobre a base de formato trapezoidal. (b) ilustração em dois modos (azul e vermelho) do método.

Pelo método das componentes paralelas, qualquer que seja a linha que une as forças aplicadas, o ponto de atuação das forças será o mesmo. Seja a linha paralela ou não para uma determinada referência. Como exemplo, a Fig. 7-a mostra a linha paralela à parede e outra linha entre os parafusos (angulada com relação à parede).

A determinação do ponto de atuação da força é importante porque permite calcular o torque de maneira mais simples. O braço da alavanca seria então medido entre o ponto de fixação e o ponto de atuação da força resultante. Como exemplo, se a força resultante da Fig. 7-b estivesse inclinada em relação ao eixo x, poderia ser determinado o esforço sobre os parafusos. Metade deles estaria submetida à compressão e a outra metade à tração.

4.2. Sistemas dinâmicos em equilíbrio estático

Em sistemas dinâmicos simples e no plano, como exemplo das rodas ou engrenagens, a força resultante com seu devido ponto de atuação simplifica a idéia do estudo do movimento. Na Fig. 8 a seguir, considere a roda e seu eixo com engaste com duas forças sendo aplicadas, **P** e **Q**. O ponto da força resultante c é onde o torque se anularia. Porém, como o eixo de rotação é centrado na roda, o movimento é produzido pela força resultante **r** de braço de alavanca co, Fig. 8-b.

A configuração das forças antiparalelas na Fig. 8-b é uma situação que o ponto da força resultante se localiza fora da região entre as forças, como esperado. Mas, ela ainda situa-se no corpo em razão de uma das forças não ser aplicada na borda do corpo. Deve ser notado, como mencionado anteriormente, que neste caso em específico o ponto da resultante se localiza sobre o corpo porque a maior força é a mais interna ao corpo. Caso contrário, com a maior força aplicada a borda (não é o caso), a resultante se posicionaria fora do corpo.

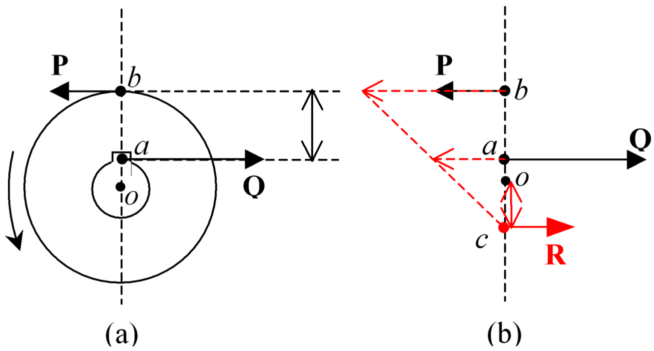


Figura 8 - Aplicação do método dos vetores antiparalelos em um sistema dinâmico. (a) Vetores força **P** e **Q** ilustrando uma força de ação e outra de resistência, respectivamente. (b) ilustração do método das componentes paralelas (vermelho) enfatizando o ponto c de atuação da força resultante.

5. Discussão e conclusão

As linhas de ação das forças são conceitos importantes que podem e são utilizados na compreensão de sistemas mecânicos. Foi notado que esse é um conceito pouco explorado nas literaturas mais básicas. Contudo, atualmente apenas a literatura mais específica e avançada utiliza o conceito na estratégia de resolução de problemas, pois considera o conceito como fundamental [18, 22]. Sua utilização gráfica exige relações de proporção entre a intensidade do vetor com o comprimento a ser desenhado, o que em muitos casos não é tão prático. Mas, esboços permitem ter uma noção sobre o sistema mecânico em questão.

Os exemplos colocados acima mostram que é possível trabalhar o conceito da linha de ação em caráter fundamental por carregar valores didáticos. Valoriza outros conceitos tais como da soma vetorial gráfica e vetor deslizante. Pode ser útil para a definição da forma forte e forma fraca da terceira lei de Newton, citada normalmente apenas em literatura avançada.

O método gráfico das linhas de ação apresentado neste trabalho em comparação com outros, traz a simplicidade de desenhar apenas uma vez o vetor força resultante, uma vez que se tenha determinado o ponto onde ele irá ser representado, além de exigir pouco espaço para os desenhos (reduzido espaço gráfico). Traz a possibilidade de fazer uma análise sintética, para certas particularidades, apenas por proporção das componentes das forças na determinação do ponto de atuação do vetor força resultante.

O ponto de atuação como a representação vetorial da força resultante são importantes por permitirem uma análise simples. Isso porque permite que o sistema possa ser reduzido a um esquema de alavanca simples.

No contexto de máquinas simples, parte II deste trabalho, os conceitos linhas de ação, ponto de representação da força resultante e vetor força resultante serão explorados na concepção física das máquinas simples.

Referências

[1] D. Halliday, R. Resnick e J. Walker, *Fundamentos de Física* (LTC, Rio de Janeiro, 2008), v. 1, 8ª ed.

[2] P.A. Tipler e G. Mosca, *Física para Cientistas e Engenheiros* (LTC, Rio de Janeiro, 2009), v. 1.

[3] P.A. Tipler, *Física* (Editora Guanabara, Rio de Janeiro, 1990) v. 1a, 2ª ed.

[4] R. Resnick e D. Halliday, *Física I* (Editora LTC, Rio de Janeiro, 2003), v. 1, 4ª ed.

[5] H.D. Young e R.A. Freedman, *Sears e Zemansky Física* (Pearson Addison Wesley, Rio de Janeiro, 2003), v. 1, 10ª ed.

[6] R.A. Serway, *Física I para Cientistas e Engenheiros* (LTC, Rio de Janeiro, 1996), 3ª ed.

[7] J. Orear, *Fundamentos da Física* (LTC, Rio de Janeiro, 1981), v. 1.

[8] R.M. Eisberg e L.S. Lerner, *Física: Fundamentos e Aplicações* (McGraw-Hill, São Paulo, 1982), v. 1.

[9] H.M. Nussenveig, *Curso de Física Básica 1: Mecânica* (Edgard Blücher, São Paulo, 2002), v. 1, 4ª ed., p. 71.

[10] M. Alonso e E.J. Finn, *Física* (Addison-Wesley, Madri, 1992), p. 123.

[11] R. Resnick, D. Halliday e K.S. Krane, *Física 1* (Editora LTC, Rio de Janeiro, 2003), 5ª ed.

[12] A. Tagliaro, *Física* (Editora FTD, São Paulo, 1969), v. 1.

[13] F. Ramalho Junior e J.I.C. dos Santos, *Os Fundamentos da Física* (Editora Moderna, São Paulo, 1982), v. 1, 4ª ed., p. 285.

[14] J.L. Sampaio e C.S. Calçada, *Física* (Atual Editora, São Paulo, 2005), 2ª ed., p. 149.

[15] A.M.R. Luz e B.A. Álvares, *Física* (Editora Scipione, São Paulo, 2005), v. 1.

[16] E. Gabriades, *Física* (Curso apostilado, São Paulo, 1956), p. 121.

[17] K.R. Symon, *Mecânica* (Campus, Rio de Janeiro, 1982), p. 259.

[18] R.C. Hibbeler, *Estática: Mecânica para Engenharia* (Pearson Prentice Hall, 2005), v. 1.

[19] F.P. Beer, E.R. Johnston Jr. e E.R. Eisenberg, *Resistências dos Materiais* (Pearson Makron Books, São Paulo, 1995), 3ª ed.

[20] T.M. Assy, *Mecânica dos Fluidos, Fundamentos e Aplicações* (LTC, Rio de Janeiro, 2004), 2ª ed.

[21] U.P. dos Santos, *Física 1* (Companhia Editora Nacional, São Paulo, 1968).

[22] F.P. Beer, E.R. Johnston Jr., E.R. Eisenberg e G.H. Staab, *Mecânica Vetorial para Engenheiros* (McGraw-Hill, Rio de Janeiro, 2006), 7ª ed.

[23] A. Fonseca, *Curso de Mecânica: Estática* (Editora ao Livro Técnico S.A, Rio de Janeiro, 1967), v. 1, 3ª ed. Suporte de uma força, ver, por exemplo, p. 23 e p. 55.

[24] H. Goldstein, C. Poole e J. Safko, *Classical Mechanics* (Addison-Wesley, New York, 2002), 3ª ed.

[25] P.F. Barbieri, Revista Brasileira de Ensino Física **33**, 4305 (2011).