

A FÍSICA DA BICICLETA NO FUTEBOL

Você já escutou algum jogador de futebol dizer algo na linha “Vamos estudar física, porque, senão, a gente não consegue fazer gol”?

É quase certo que não. Afinal, é difícil imaginar que alguém precise desse tipo de conhecimento para praticar – ou entender de – futebol.

No entanto, a física está lá. Às vezes, de forma escancarada; às vezes, de forma sutil, nos detalhes. Futebol é, na verdade, pura física, como veremos nas páginas a seguir.

Marcos Duarte

Curso de Engenharia Biomédica,
Centro de Engenharia, Modelagem
e Ciências Sociais Aplicadas,
Universidade Federal do ABC (SP)

A física – cujo nome vem do grego *physis*, natureza – é a ciência que estuda os fenômenos naturais. Os corpos em movimento é um deles. E, para isso, usa conceitos como energia, força, velocidade, aceleração, espaço, tempo etc. Dá para notar, então, que jogadores de futebol podem ser considerados grandes especialistas em usar a física para fazer uma jogada – afinal, fazer com que a bola adquira um movimento em curva acentuada, como em um chute com efeito do ex-lateral esquerdo da seleção brasileira Roberto Carlos, sem dúvida, requer conhecimentos intuitivos de física avançada que poucos os têm.

>>>



FOTO POPPER/GETTY IMAGES

Dizem que, no futebol, o gênio é aquele que desafia – e, como dito popularmente, até mesmo ‘viola’ – as leis da física. Não. É justamente o contrário: só o ‘perna de pau’ quer, em vão, violar as leis da física. O jogador talentoso tem tais leis incorporadas a ele e as usa como se fosse mágica.

Dito isso, vamos entender como Pelé – para muitos, o maior dos gênios no futebol – explorava as leis da física, para executar o famoso (e raro) chute de bicicleta perfeito.

Conservando o movimento Entre tantas leis da física, a que nos interessa aqui é a chamada conservação da quantidade de movimento angular, pois, com ela, podemos explicar certos movimentos no futebol.

Um corpo que gira está dotado de quantidade de movimento angular. Essa grandeza é obtida quando multiplicamos a chamada velocidade angular pela inércia de rotação de um corpo.

Velocidade angular de um corpo é simplesmente o quanto ele roda por unidade de tempo. Por exemplo, se um ginasta dá um salto mortal (uma cambalhota no ar) por segundo, dizemos que sua velocidade angular é de 360 graus por segundo ($360^\circ/\text{s}$) ou de 2π radianos por segundo ($2\pi \text{ rad/s}$).

Inércia rotacional é uma medida da dificuldade de alterar o estado do movimento de um corpo. Por exemplo, é mais fácil iniciar ou parar com as próprias mãos

o giro de uma roda de bicicleta do que uma roda de trator, pois a roda de trator tem massa maior. Dizemos, portanto, que a inércia de rotação da roda de trator é maior que a da bicicleta.

Note outra sutileza: esta inércia de rotação também irá depender da distância da qual a massa está do eixo de giro – quanto maior esta distância, maior a inércia rotacional. Por exemplo, a inércia rotacional do corpo do ginasta que dá uma cambalhota em torno de um eixo imaginário que passa por seus quadris de um lado a outro é cerca de três vezes maior quando ele está com o corpo estendido do que quando está com o corpo todo encolhido, abraçando as pernas na altura dos joelhos.

E, agora, a lei de quantidade de movimento angular entra em cena. Se o ginasta estiver girando no ar com o corpo estendido e, então, se encolher (isto é, diminuir em três vezes sua inércia rotacional), sua velocidade angular irá aumentar na mesma proporção (três vezes), pois o produto entre velocidade angular e inércia de rotação – ou seja, a quantidade de movimento angular – é conservado no ar.

Como uma tesoura Os registros de bicicletas de Pelé mostram que ele sempre a executava de forma peculiar: antes de chutar a bola, as duas pernas se distanciavam, se cruzavam no ar e voltavam a se separar, como o movimento de uma tesoura – e esse detalhe torna o movimento da bicicleta ainda mais belo.

Mas qual a função – se há alguma – do movimento da perna que não chuta (esquerda) no sentido contrário do movimento da perna que chuta, momentos antes do contato com a bola? Uma possibilidade: a forma com que Pelé executava a bicicleta tem uma razão além da estética, pois, talvez, o tal movimento fosse para usar a seu favor a lei de conservação da quantidade de movimento angular.

Do ponto de vista da mecânica – área da física que estuda o movimento e o repouso dos corpos –, em um corpo com segmentos articulados (como o humano), a quantidade de movimento angular total é a soma das quantidades de movimento angular de cada segmento.

Como no caso do ginasta que dá uma cambalhota no ar, quando um jogador executa uma bicicleta, a única força externa que atua sobre ele é a da gravidade, que não provoca rotação do corpo como um todo. Isso significa que, para um corpo no ar, sua quantidade de movimento angular total se conserva. Aqui, é fundamental compreender que essa lei de conservação se aplica somente ao corpo como um todo, pois a quantidade de movimento angular de cada segmento pode variar (quase) livremente.

Corpo dividido Para nossos propósitos aqui, vamos assumir a seguinte hipótese: Pelé buscava alterar a quantidade de movimento angular de cada segmento de seu corpo envolvido na jogada para executar a bici-

cleta de forma mais eficiente. Para testar essa hipótese, precisamos, então, analisar um chute de bicicleta de Pelé, medir essas grandezas, fazer as contas e verificar se a hipótese é confirmada.

Para uma análise quantitativa, o vídeo mostrando a bicicleta de Pelé deve atender a uma condição: se apenas um ângulo de visão está disponível, para evitar erros de perspectiva, esse ângulo deve ser perpendicular ao plano de movimento. Com essas imagens, devemos ser capazes de estimar a métrica do vídeo, isto é, a relação entre as dimensões reais da cena e da imagem do vídeo.

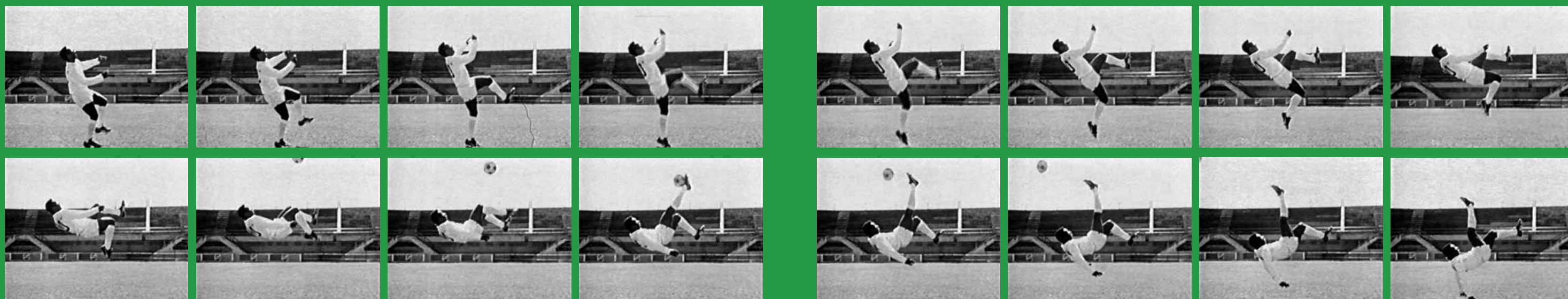
E um vídeo com essas condições existe? Para nossa sorte, sim! Ele é da década de 1970. Para definir a posição dos segmentos do corpo, devemos analisar o vídeo quadro a quadro – isso pode ser feito, por exemplo, com os programas gratuitos SkillSpector ou Tracker (ver ‘Sugestões para leitura’).

Dividimos o corpo de Pelé em 12 segmentos rígidos (pés, pernas, coxas, braços, antebraços/mãos, tronco e cabeça), articulados entre si e definidos por 16 pontos anatômicos (pontas do pé direita e esquerda, tornozelos, joelhos, quadris, ombros, cotovelos, punhos, bem como base e ápice da cabeça). Esses 16 pontos, mais a posição da bola, foram digitalizados manualmente para cada um dos quadros do vídeo.

Para determinarmos a quantidade de movimento de cada segmento do corpo, certas características corporais (massa, centro de massa e inércia rotacional de

>>>

Figura 1. Principais quadros do vídeo com o chute de bicicleta de Pelé analisado neste artigo



cada segmento) foram estimadas a partir de um modelo antropométrico com valores médios, obtidos a partir de medidas feitas por meio de imagens radiográficas de uma amostra de pessoas – em nosso caso, seria impossível conhecer essas características reais dos segmentos do corpo de Pelé, cuja massa e estatura à época do vídeo foram consideradas, respectivamente, como 72 kg e 1,73 m.

Questão-chave Analisamos o vídeo quadro a quadro (96 no total) com o chute (figura 1). Os resultados do cálculo para as quantidades de movimento angular do corpo inteiro e de cada uma das pernas durante o chute são mostrados na figura 2.

Em qualquer movimento humano no ar, ainda que se possa mudar a inércia rotacional e a velocidade angular de cada segmento e do corpo inteiro, o produto dessas duas grandezas físicas, como vimos, não muda para o corpo inteiro, por causa da lei de conservação da quantidade de movimento angular.

A quantidade de movimento angular total do corpo estimada em relação à fase aérea do chute tem uma pequena variação, que podemos creditar ao erro rotineiramente presente em qualquer medida experimental. Considerando essa margem de erro, a quantidade de movimento angular total do corpo é, como esperada, constante, exceto quando parte dela é transferida para a bola no instante do chute.

Mas a questão-chave é compreender o papel da quantidade de movimento angular de cada uma das pernas durante a bicicleta.

Ação e reação Para compreender a função do movimento da perna contralateral – a que não realiza o chute –, no sentido contrário da perna de chute (direita), vamos primeiramente examinar o que pode acontecer com o corpo quando o chute de bicicleta é feito sem esse movimento.

Chutes de bicicleta sem o movimento de tesoura são, de fato, observados em jogos de futebol, mas são mais

simples e menos esplêndidos. Sem o uso da ‘tesoura’, quando o jogador salta e gira a perna em alta velocidade para chutar, esse movimento cria uma quantidade de movimento angular. Como a soma dessa quantidade de movimento angular mais a quantidade de movimento angular do resto do corpo deve ser constante, isso irá gerar, no resto do corpo, uma quantidade de movimento angular igual à da perna do chute, mas em sentido contrário, de tal forma que a soma dessas quantidades seja zero.

Dessa forma, a aplicação da lei de conservação é equivalente à aplicação da terceira lei de Newton (ou lei de ação e reação): para cada ação, há uma reação igual em intensidade (ou módulo, como dizem os físicos) e direção, mas em sentido oposto. Isto é, ao girar a perna no ar, o resto do corpo é perturbado e gira no sentido contrário.

No entanto, o sucesso do chute de bicicleta depende da interceptação exata da bola com o pé, o que requer grande habilidade de planejamento e controle dos movimentos, bem como uso de informação visual. A estabilidade da cabeça durante tarefas dinâmicas é, em geral, fundamental para os seres humanos, mas a perturbação criada pela perna do chute afeta essa estabilidade. O chute pode ser feito nessas condições, mas, provavelmente, terá uma menor chance de sucesso.

Equilíbrio no ar O que fazer, então, para estabilizar a cabeça e o tronco para realizar o chute de bicicleta?

Uma solução possível é anular, de alguma maneira, a perturbação introduzida pela perna de chute. A análise da bicicleta de Pelé – que, como vimos, apresenta o movimento de tesoura das duas pernas em sentidos opostos – revela exatamente essa estratégia. No gráfico mostrado na figura 2, podemos observar que as quanti-

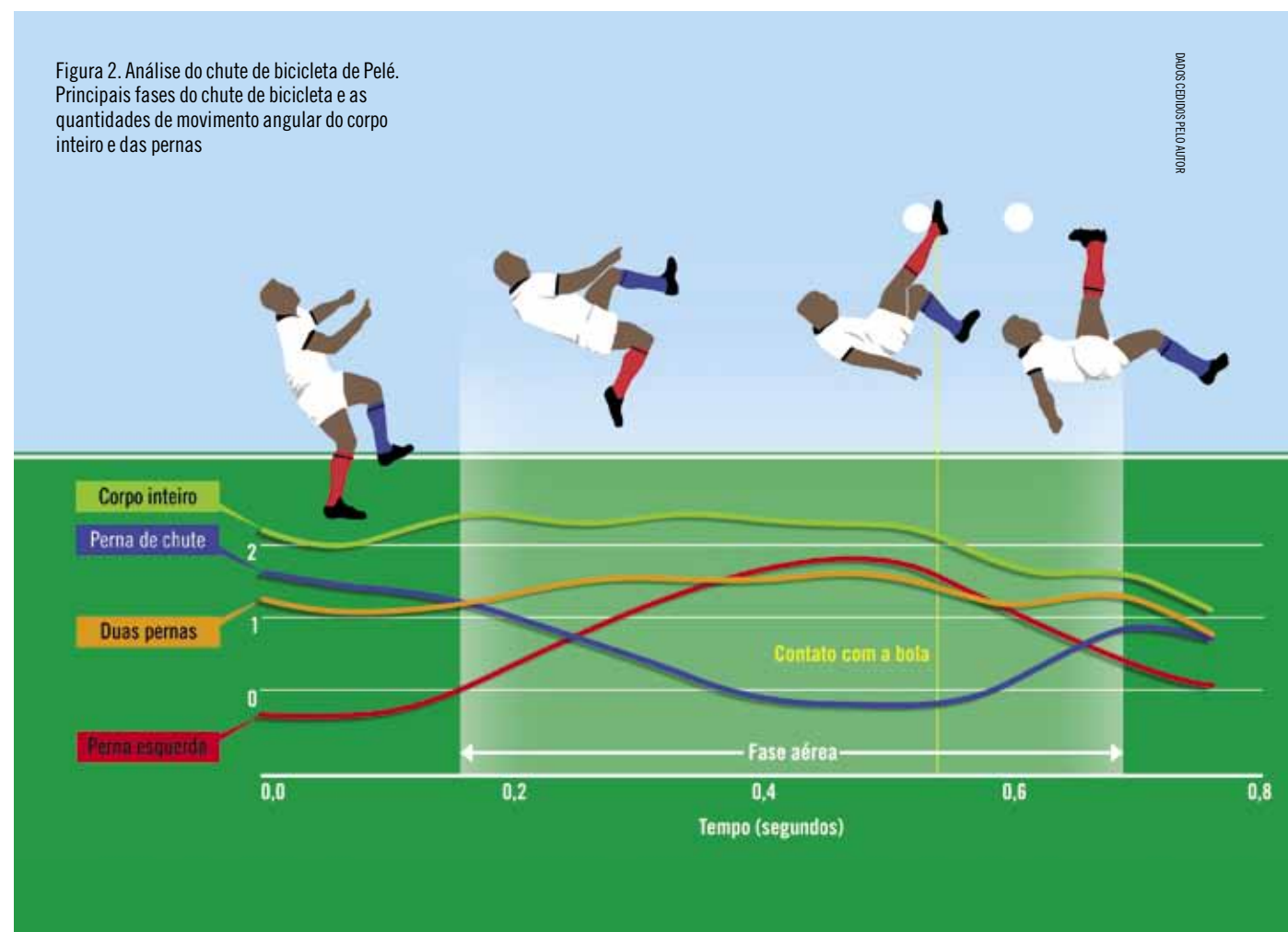
dades de movimento angular das duas pernas são simétricas, e a soma delas é constante na fase aérea. Isso sugere que o movimento da perna esquerda tem como função anular a perturbação introduzida pela perna de chute. E é essa manobra que mantém a cabeça e o tronco mais estáveis no ar para a execução da bicicleta.

Outro benefício em realizar o movimento das duas pernas simultaneamente, mas em sentidos contrários, é que, no ar, sem um ponto de apoio, quando contraímos vigorosamente apenas os músculos flexores do quadril de um dos lados do corpo para realizar o chute com uma perna, os músculos não só puxam a perna – que é o que se deseja –, mas também o quadril e tronco no sentido contrário.

Mais uma vez, esse movimento do quadril e tronco, no entanto, diminui a eficiência do chute. Então, seria melhor ter o quadril e tronco momentaneamente fixos, para poder realizar o chute. Para tanto, se o quadril contralateral for estendido no momento da flexão da perna de chute, serão geradas forças opostas que tenderão a se anular e estabilizar a região dos quadris.

Parceiras de jogada A partir dessa análise, duas características podem ser sugeridas como distintivas do chute de bicicleta perfeito. Primeira: por definição, deve-se estar de costas e com o corpo paralelo ao chão no momento do chute da bola. Segunda (e mais exclusiva): deve-se executar um movimento particular com as pernas, movendo-as em direções opostas, antes do chute como uma tesoura – ou, na linguagem da física, as pernas devem ter momentos angulares complementares.

Qualquer movimento na natureza, de partículas a planetas – incluindo um chute de bicicleta de Pelé –, não pode violar os princípios fundamentais de conservação da física. Dizer isso não é uma tentativa de reduzir o esplendor desse momento único. Pelo contrário, é realçar uma visão que nos permite contemplar como física e futebol são parceiras na mesma jogada. **GH**



PESQUISA TEM FOCO NO MOVIMENTO

O autor deste artigo é formado em física e tem se dedicado ao estudo do movimento de sistemas biológicos. Na biomecânica, em particular, seu tema principal de pesquisa tem sido o controle do equilíbrio e da locomoção em seres humanos.

Sugestões para leitura

DUARTE, M. e OKUNO, E. *Física do futebol – Mecânica*. São Paulo: Editora Oficina de Texto, 2012.
JESUS, V.L.B. “Impedido ou não?” em *Ciência Hoje*, v. 51, nº 302, Rio de Janeiro, 2013.

NA INTERNET

Bicicleta de Pelé (vídeo): <http://demotu.org/x/pele/pele.avi>
SkillSpector: <http://video4coach.com>
Tracker: <https://www.cabrillo.edu/~dbrown/tracker/>