

# A Física do Futebol

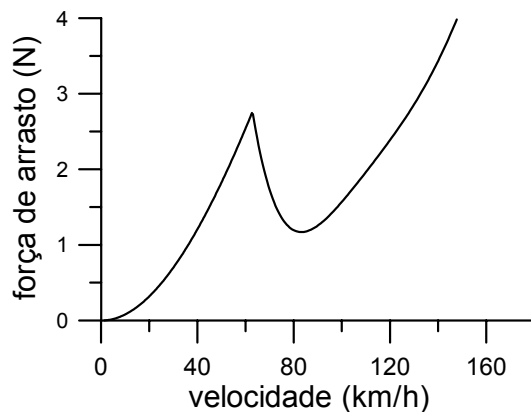
C. E. Aguiar e G. Rubini

Existem muitos estudos sobre a física do beisebol, golfe, tênis, e outros esportes. Mas, por incrível que pareça, encontra-se pouca coisa sobre a física do esporte mais popular no mundo (para não falar em certo país): o futebol. Nesta nota nós vamos tentar preencher um pouco dessa lacuna, discutindo as forças aerodinâmicas que atuam sobre a bola de futebol. Veremos como um fenômeno notável, a ‘crise do arrasto’, desempenha um papel importante no jogo de futebol. A crise do arrasto é a redução abrupta que a resistência do ar sofre quando a velocidade da bola aumenta além de um certo limite. A relevância da crise para o futebol pode ser demonstrada com a ajuda um lance famoso, o gol que Pelé perdeu na Copa de 1970, contra a Tchecoslováquia — sem a crise o chute de Pelé teria tido um desfecho totalmente diverso daquele que encantou o estádio, e o lance provavelmente estaria esquecido hoje. Veremos ainda que outro fenômeno aerodinâmico, o efeito Magnus, também desempenhou um papel decisivo na jogada.

## A força de arrasto

Uma bola de futebol em movimento no ar está sujeita a forças aerodinâmicas causadas pela pressão e viscosidade do meio. A força resultante pode ser decomposta em duas componentes: o arrasto, antiparalelo à velocidade, e a sustentação, perpendicular à velocidade.

A força de arrasto depende fortemente da velocidade  $V$  com que a bola se move em relação ao ar. A Fig. 1 mostra a força de arrasto sobre uma bola de futebol, como função da velocidade.



**Figura 1.** Resistência do ar sobre a bola de futebol em função da velocidade.

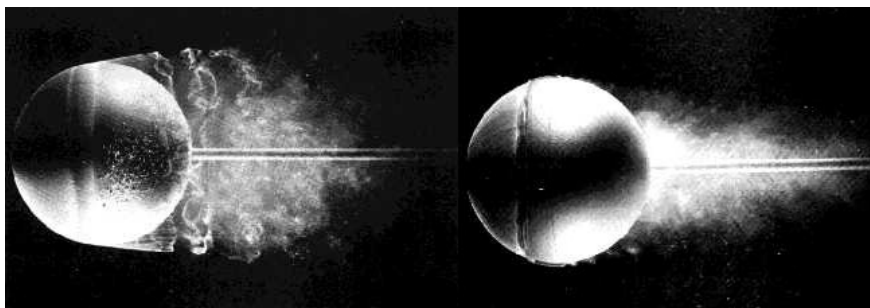
Vemos que força de arrasto aumenta com a velocidade, até uns 60 km/h, quando cai abruptamente, e só volta a subir após os 80 km/h. Esta redução drástica da resistência do ar é chamada de crise do arrasto. A velocidade máxima que jogadores profissionais conseguem dar à bola de futebol é da ordem de 110 km/h. Os melhores chutadores atingem algo como 130 km/h. Portanto, durante uma partida de futebol a bola deve passar várias vezes pelo ponto de crise.

## A crise do arrasto e a camada limite

A crise do arrasto está diretamente associada ao comportamento da “camada limite” de ar que se forma em torno da bola. A camada limite tem origem na aderência das moléculas do ar à superfície da bola. A viscosidade transmite parcialmente esta aderência às moléculas mais distantes, formando uma região que tende a mover-se com a bola. Esta região é a camada limite, ou camada de Prandtl. É por isso que as pás de um ventilador ficam sujas – as partículas de poeira acumuladas na sua superfície ficam dentro da camada limite, onde não há vento para varrê-las.

A camada limite não envolve toda a bola, a não ser a velocidades tão pequenas que são irrelevantes para o jogo de futebol. A velocidades razoáveis, a camada limite separa-se da parte posterior da bola, gerando uma esteira como a mostrada na Fig. 2 (esquerda). Esta separação causa uma diminuição significativa da pressão na parte de trás da bola. A força de arrasto é explicada pela diferença entre a alta pressão na parte dianteira da bola e a baixa pressão na traseira.

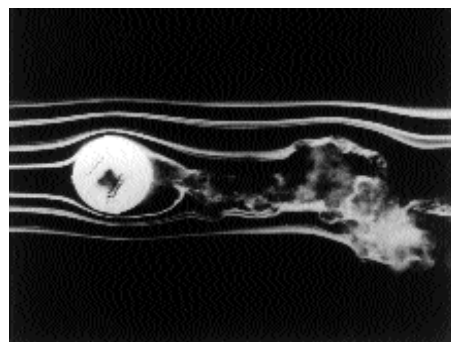
A camada limite também ajuda a entender a crise do arrasto. A altas velocidades o fluxo de ar em torno da bola torna-se turbulento, permitindo que a camada limite resista melhor à tendência de separação. Com isso o ponto de descolamento move-se mais para trás da bola, diminuindo a área de baixa pressão na esteira, e conseqüentemente reduzindo a resistência do ar. A Fig. 2 (direita) mostra a separação de uma camada limite turbulenta.



**Figura 2.** Separação da camada limite em uma esfera. Esquerda: camada laminar. Direita: camada turbulenta.

## O efeito Magnus

Quando a bola de futebol gira em torno de seu centro, uma força de sustentação (perpendicular à velocidade e ao eixo de rotação) passa a agir sobre ela: a força de Magnus. A explicação para esta força nas bolas esportivas é dada pelo comportamento da camada limite sob rotações. A Fig. 3 mostra o fluxo de ar em torno de uma bola que gira no sentido horário.

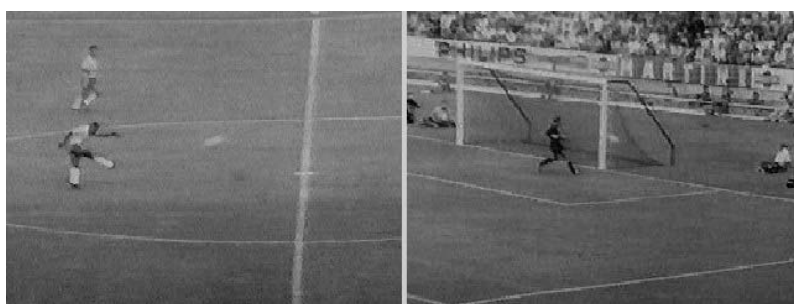


**Figura 3.** Separação da camada limite em uma bola girando no sentido horário.

Note que a separação da camada limite é antecipada na parte de baixo da bola, em que a rotação se opõe ao fluxo de ar, e adiada no lado de cima, em que a rotação acompanha a passagem do ar. A assimetria na separação da camada limite empurra o ar atrás da bola para baixo. Pela 3ª Lei de Newton, a bola sofre uma força em sentido contrário, para cima, o que dá origem ao efeito Magnus.

### O gol que Pelé não fez

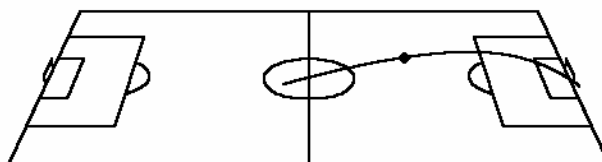
Copa de 1970, partida Brasil x Tchecoslováquia – Pelé pega a bola no meio de campo, vê o goleiro tcheco adiantado, e arrisca um chute que entrou para a história do futebol brasileiro (Fig. 4). No início do lance, a bola possuía uma velocidade de 105 km/h, e girava a aproximadamente 7 rotações por segundo (no sentido anti-horário de quem olha a figura). Três segundos depois a bola passava rente à trave, para alívio do assustado goleiro.



**Figura 4.** Esquerda: o chute de Pelé.  
Direita: a bola passa rente à trave.

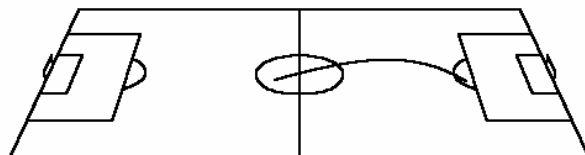
### Futebol no computador

Na Fig. 5 vemos uma simulação do chute de Pelé, levando em conta a resistência do ar e a força de Magnus.



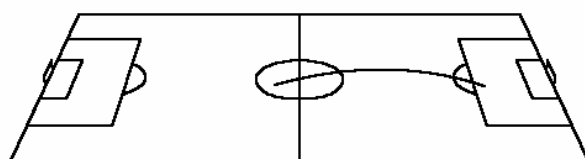
**Figura 5.** Simulação do chute de Pelé. A crise do arrasto ocorre no ponto marcado sobre a trajetória.

Podemos investigar a importância da crise do arrasto na jogada de Pelé tirando-a de ação, ou seja, fazendo a resistência do ar crescer sempre com a velocidade. O que aconteceria com a bola caso a crise não reduzisse a resistência do ar está mostrado na Fig. 6; ela não chegaria nem mesmo à grande área. Portanto, a crise do arrasto desempenhou um papel importantíssimo — sem ela a jogada de Pelé não teria entrado para a história do futebol.



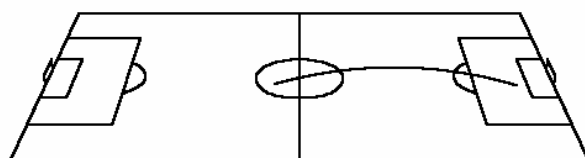
**Figura 6:** O que aconteceria com a bola chutada por Pelé se não houvesse a crise do arrasto.

A importância do efeito Magnus pode ser avaliada da mesma forma. Se Pelé não tivesse dado nenhuma rotação à bola, a trajetória seria a mostrada na Fig. 7. Novamente, a bola não chegaria nem perto do gol. Sem a força de sustentação criada pelo efeito Magnus, o chute de Pelé teria sido apenas um belo lançamento para Jairzinho.



**Figura 7:** O que aconteceria com a bola chutada por Pelé sem o efeito Magnus.

Mas talvez o mais surpreendente é o que ocorreria se não existissem nem o arrasto nem a força de Magnus (ou seja, se a bola tivesse sido chutada no vácuo). A trajetória neste caso seria a parábola de Galileu, mostrada na Fig. 8. Vemos que a bola cairia bem antes do gol, apesar de não haver força de arrasto. Isso mostra que a sustentação aerodinâmica criada pela rotação compensou largamente o efeito da resistência do ar, levando a bola mais longe.



**Figura 8:** O que aconteceria com a bola chutada por Pelé se ela estivesse no vácuo.

**Para saber mais:**

- *Física do Futebol*, <http://www.if.ufrj.br/~carlos/futebol.html>
- *A aerodinâmica da bola de futebol*, C.E. Aguiar e G. Rubini, Revista Brasileira de Ensino de Física, vol.26, no.4, p. 297 (2004).
- *O efeito folha seca*, B. Leroy, Revista Brasileira de Física, vol.7, p.693 (1977).
- *A dinâmica dos fluidos complementada e a sustentação da asa*. K. Weltner et al., Revista Brasileira de Ensino de Física, vol.23, no.4, p.429 (2001).

A *Revista Brasileira de Ensino de Física* está na Internet, em <http://www.scielo.br/rbef>