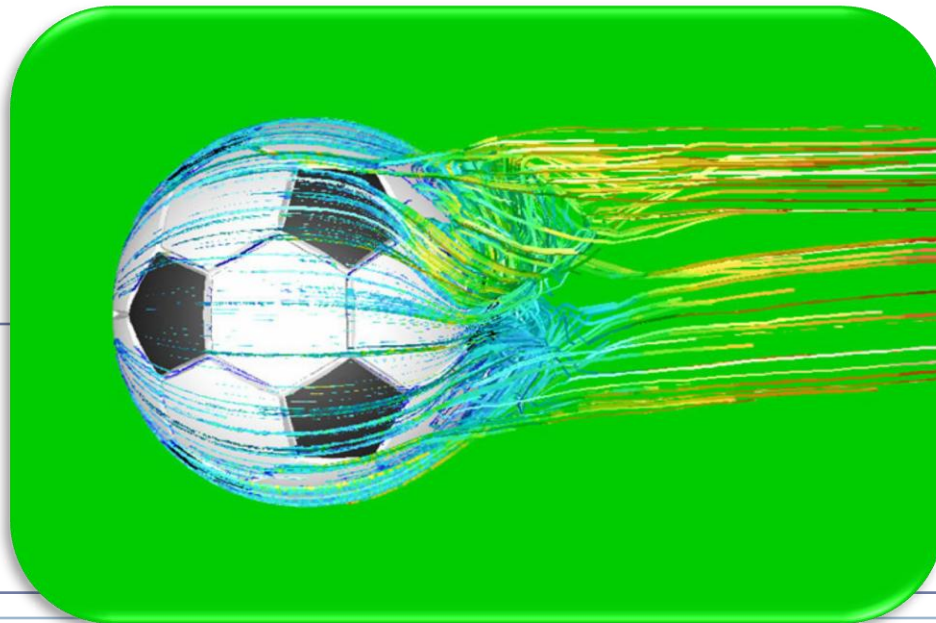


Forças aerodinâmicas no Futebol



Dr. Guanys de Barros Vilela Junior

Introdução

- ▶ A chamada "crise do arrasto", desempenha um papel importante em situações normais de jogo. 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 importância da crise do arrasto no futebol aqui será analisada a partir de um lance famoso, o gol que Pelé perdeu na Copa de 1970, no jogo contra a Tchecoslováquia. Veremos que sem a crise a bola chutada por Pelé teria seguido uma trajetória completamente diferente da observada. Outro fenômeno aerodinâmico, o efeito Magnus (causado pela rotação da bola), desempenhou um papel relevante na dinâmica da bola.
-



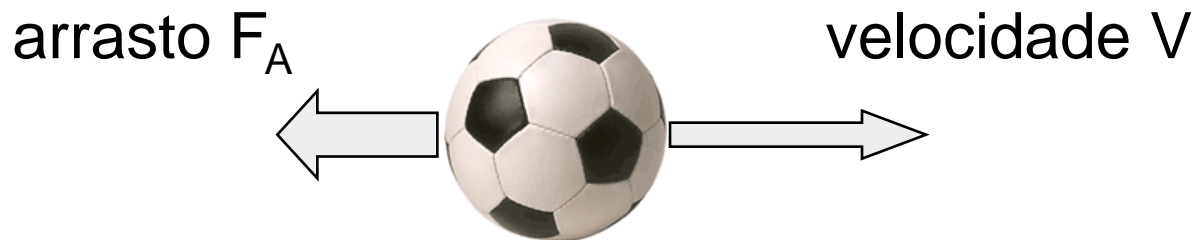
A Força de Arrasto

Ar

- *densidade*: $\rho \approx 1,2 \text{ kg/m}^3$
- *viscosidade*: $\eta \approx 1,8 \times 10^{-5} \text{ kg m}^{-1} \text{ s}^{-1}$

Bola de futebol

- *diâmetro*: $D = 0,22 \text{ m}$
- *área frontal*: $A = 0,038 \text{ m}^2$



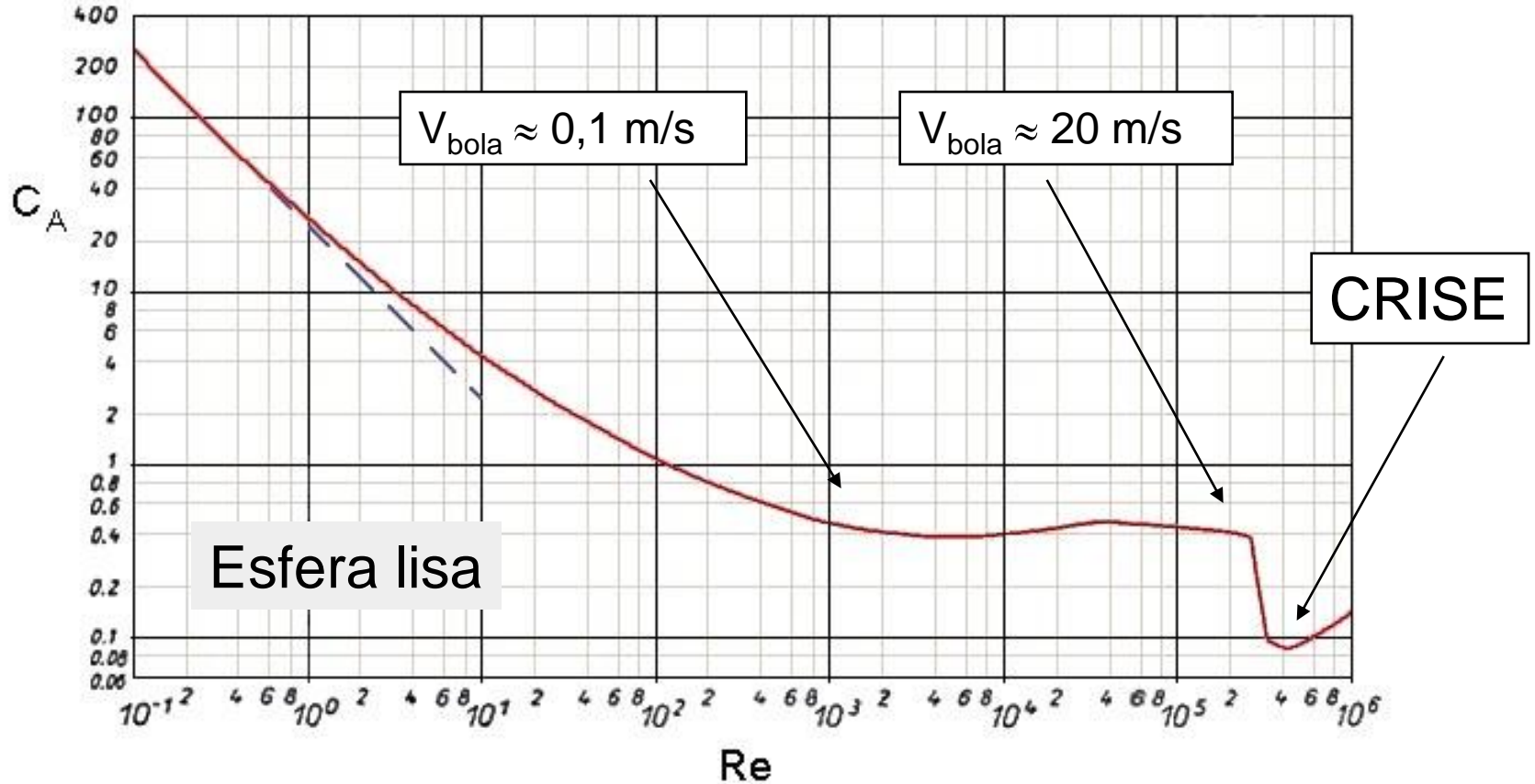
- Força de arrasto

$$F_A = \frac{1}{2} C_A \rho A V^2$$

- O coeficiente de arrasto C_A depende do número de Reynolds:

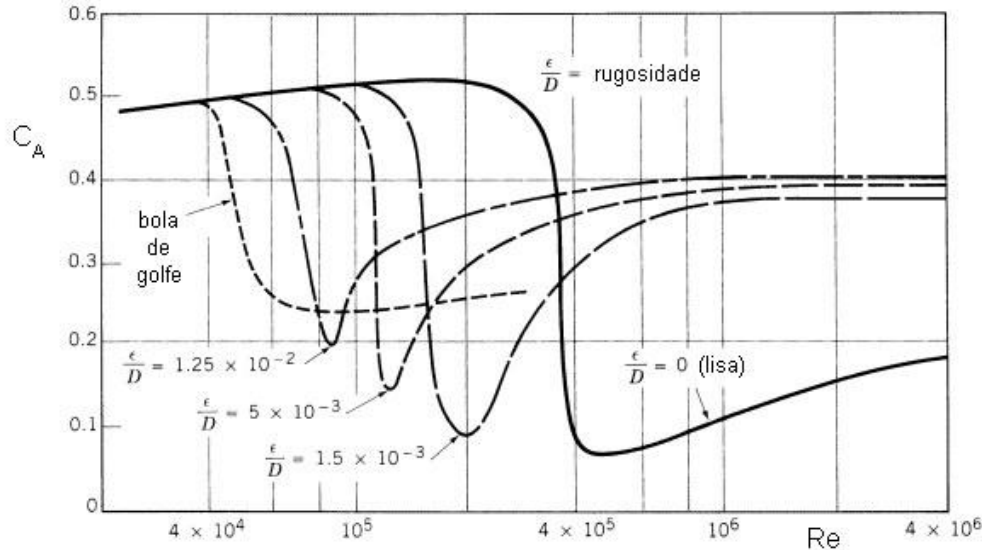
$$Re = \frac{\rho D V}{\eta}$$

A Crise do Arrasto



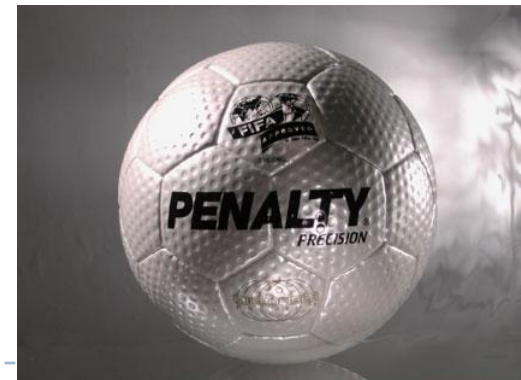
▶ *A crise diminui em 80% a resistência do ar!*

Efeito da Rugosidade

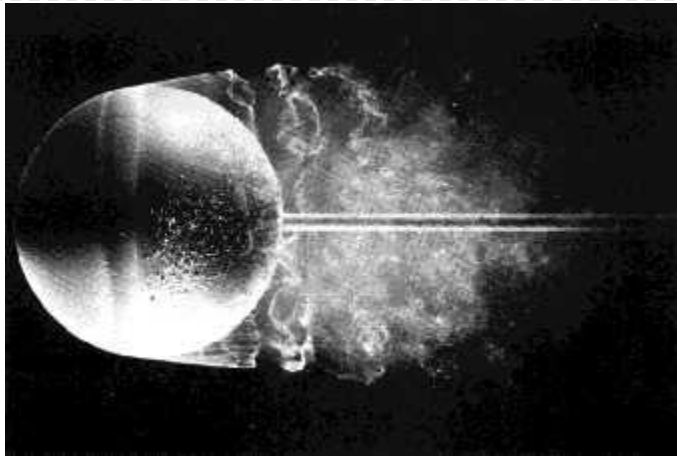


A crise do arrasto ocorre em números de Reynolds menores para esferas de superfície irregular. A altas velocidades, esferas rugosas encontram menos resistência que esferas lisas!

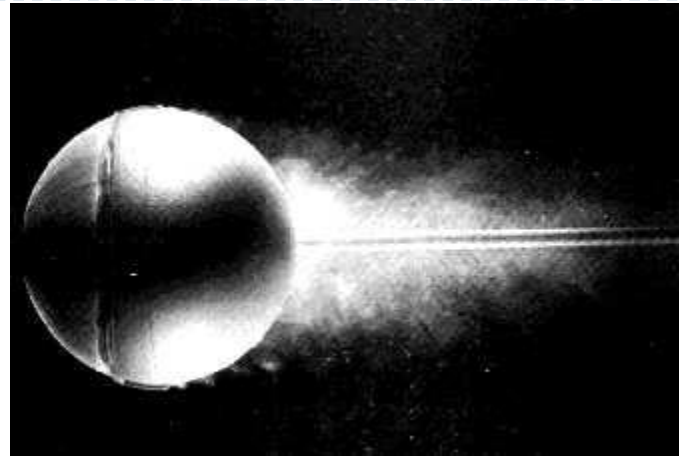
Bola de futebol inspirada na bola de golfe. As cavidades na superfície reduzem a força de arrasto



A Crise e a Camada Limite



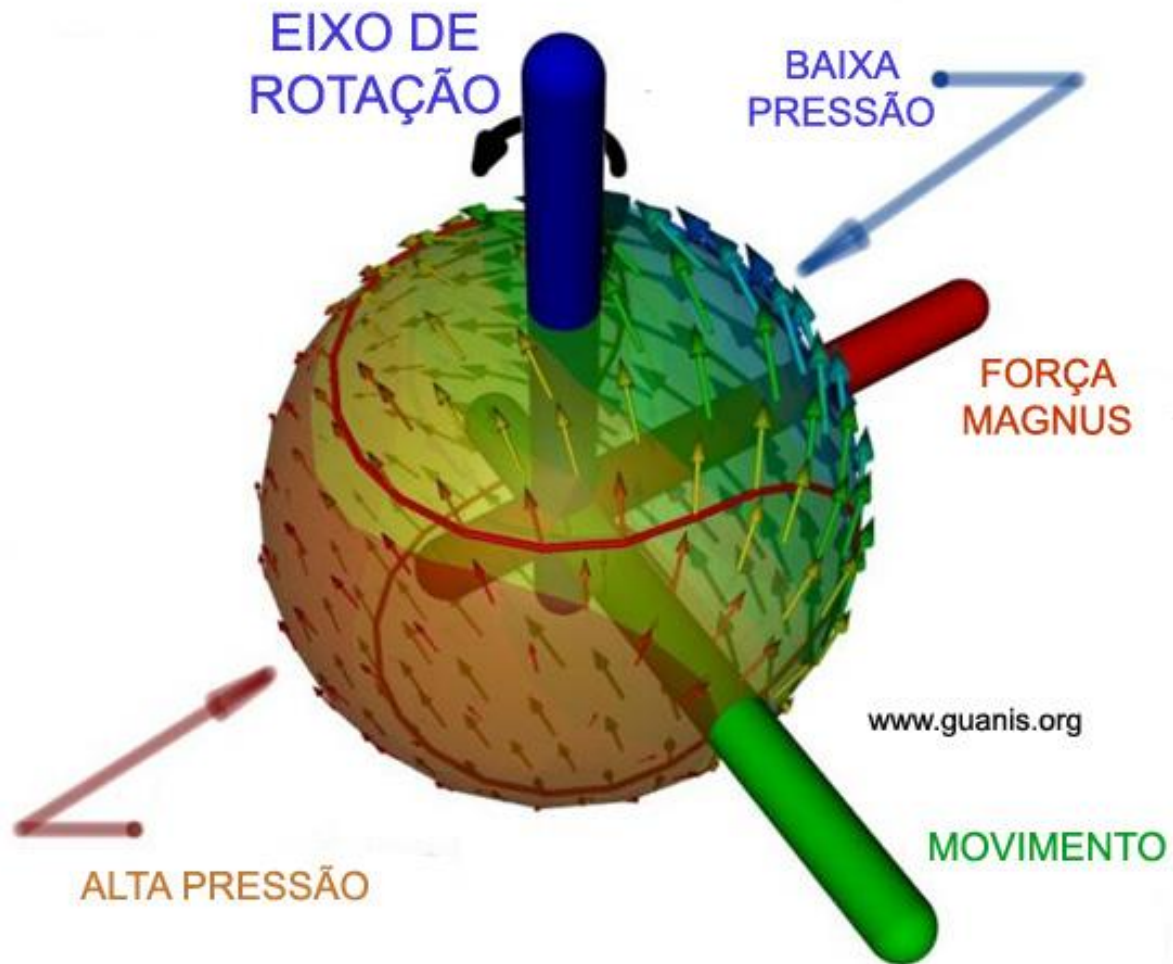
camada limite laminar



camada limite turbulenta

O ar próximo à superfície da bola tende a mover-se com ela, criando uma região conhecida como camada limite. A baixas velocidades a camada limite envolve completamente a bola, e o fluxo no seu interior é laminar. Para velocidades maiores a camada limite laminar separa-se da bola e cria uma esteira de baixa pressão (figura acima à esquerda). Se a velocidade da bola aumenta ainda mais a camada limite torna-se turbulenta, e ocorre a crise do arrasto. A turbulência faz com que o ponto de separação da camada mova-se para trás na esfera (figura acima à direita), diminuindo a área de baixa pressão e reduzindo a resistência do ar.

O poder do Efeito Magnus



Efeito Magnus

- Força de Magnus:

$$\mathbf{F}_M = \frac{1}{2} C_M \rho A r \mathbf{w} \times \mathbf{V}$$

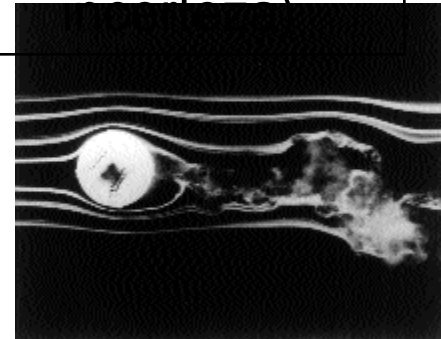
C_M = coeficiente de Magnus

\mathbf{w} = velocidade angular

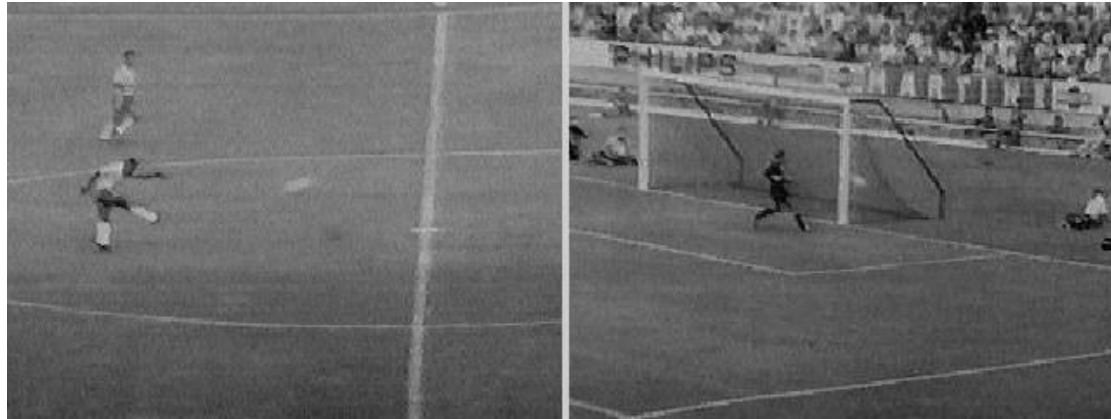
r = raio da bola

Na figura ao lado a bola gira no sentido horário. Note como a separação da camada limite é antecipada no lado da bola em que a rotação se opõe à passagem do ar, e adiada no lado em que o movimento acompanha o fluxo. A assimetria da separação faz com o ar seja desviado para baixo, gerando uma força para cima na bola.

$C_M \sim 1$
(com grande Re)



O gol que Pelé não fez

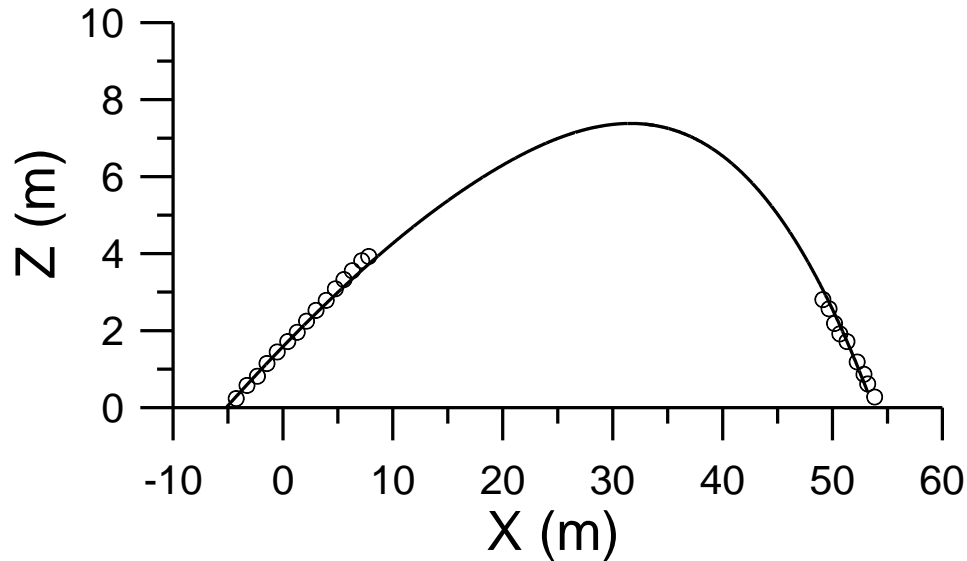


- ⊙ A jogada ocorreu na Copa do Mundo de 1970, na partida Brasil x Tchecoslováquia. Com um vídeo contendo o lance, e um programa de análise de imagens escrito em Logo, obtivemos a posição da bola em cada quadro do filme. As condições iniciais do chute de Pelé estão mostradas na tabela abaixo, assim como o ponto final da trajetória.

	T	(X Y Z)	(V _x V _y V _z)	V	Θ
	[s]	[m]	[m/s]	[m/s]	[graus]
Início	0,00	(-5,2 -2,9 0,0)	(27,8 -0,4 8,8)	29,1	17,6
Final	3,20	(54,3 3,7 0,0)	(15,2 -0,2 -8,9)	17,6	-30,2

- A origem do sistema de referência é o meio do campo. O eixo X segue o comprimento do campo na direção da meta adversária, Y segue a largura afastando-se da câmera, e Z aponta para cima.

A Trajetória da Bola



- *Pontos*: dados extraídos do vídeo.
- *Linha*: cálculo com o modelo abaixo.

Modelo:

$$C_A = \begin{cases} 0,5 & V < V_{\text{crise}} \\ 0,1 & V > V_{\text{crise}} \end{cases}$$

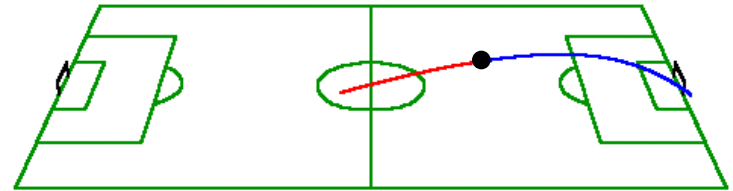
$$C_M = 1,0$$

Parâmetros ajustados:

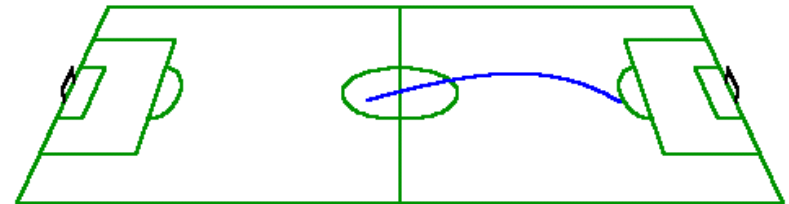
- $V_{\text{crise}} = 23,8 \text{ m/s}$
- $f = \omega_y / 2\pi = -6,84 \text{ Hz}$

Futebol em Logo

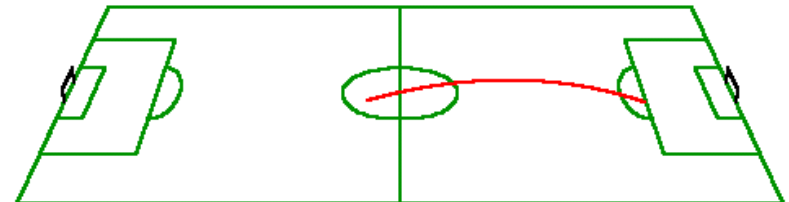
Simulação do chute de Pelé
(o ponto marca o local da crise)



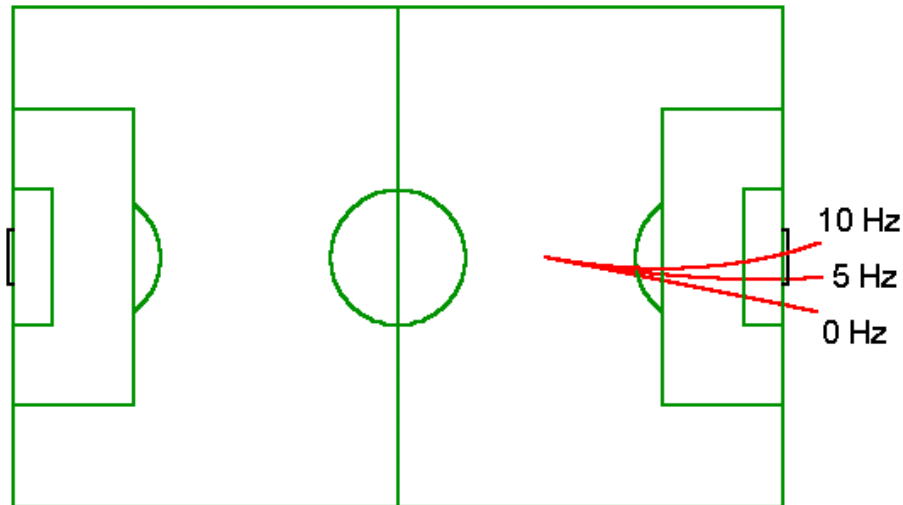
O que ocorreria sem a crise
do arrasto ($V_{\text{crise}} = \infty$)



O que ocorreria sem o
efeito Magnus ($f = 0$)



Bolas de Efeito



- ▶ Acima vemos a trajetória de bolas chutadas do mesmo ponto e com a mesma velocidade, mas com diferentes rotações em torno do eixo vertical (0, 5 e 10 Hz). A bola sem rotação (0 Hz) passa bem longe da trave - já as bolas de efeito vão para dentro do gol.



Conclusões

- A crise do arrasto e o efeito Magnus desempenham um papel fundamental na dinâmica de uma bola de futebol.
 - O futebol parece ser um dos poucos esportes com bola (além do golfe e do tênis de mesa) em que a crise do arrasto se manifesta de forma significativa.
 - Aplicar o Efeito Magnus corretamente (basta treinar!) é suficiente para gols olímpicos!
-
- 