

Alguma física dos saltos em altura e distância

Some physics of the high and long jump

Otaviano Helene

Instituto de Física, Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, Brasil

Contato do autor: otaviano@if.usp.br

Resumo. Neste artigo, mostramos um modelo simples que foi desenvolvido para explicar os saltos em altura e distância. O modelo é baseado na máxima energia que um atleta pode produzir usando apenas uma perna. Conservação do momento angular é usada para explicar porque um atleta deve correr horizontalmente antes de executar um salto vertical. Os resultados obtidos concordam com as observações.

Palavras-chave. Salto em altura; Salto em distância; Velocidade; Energia; Momento angular.

Abstract. In this paper we show a simple model developed to describe the high and long jump. The model is based on the maximum energy an athlete can produce using single leg. Conservation of angular momentum is used to explain why an athlete should run horizontally before the vertical jump. The obtained results agree with observations.

Keywords. High jump; Long jump; Speed; Energy; Angular momentum.

Recebido 22mar12

Aceito 27nov12

Publicado 15jan14

Introdução

Nós aprendemos e ensinamos que para lançar alguma coisa bem longe, o melhor é lançá-la formando um ângulo de cerca 45° com a horizontal, desde que a resistência do ar não seja muito importante, o lançamento ocorra próximo ao nível do chão e a velocidade que conseguimos imprimir àquela coisa não dependa do ângulo que a joguemos. Calcular aquele ângulo ideal de lançamento é um exercício típico proposto a estudantes do ensino médio. Há alguns anos atrás, este resultado bem conhecido, até mesmo do público em geral, motivou uma questão curiosa entre a comunidade de físicos (Harris 1997): por que os atletas que se dedicam aos saltos em distância decolam em um ângulo de cerca de 20° com a horizontal e não com um ângulo de 45°? Se a decolagem ocorresse a um ângulo de 45°, um atleta poderia, facilmente, saltar distâncias maiores do que dez metros. Para isso, bastaria correr a velocidades superiores a 35 km/h – valor nada absurdo levando-se em conta que velocistas atingem velocidades maiores que 40 km/h e muitos dos atletas que se dedicam ao salto em distância são excelentes velocistas. Carl Lewis, por exemplo, é um desses atletas que combinam o salto em distância com as corridas de cem metros, tendo seus recordes, nas duas modalidades, reconhecidos pela Associação Internacional de Federações de Atletismo (IAAF, 2012).

Entretanto, o recorde masculino atual, conquistado pelo americano Mike Powell em 1991, é de 8,95 m e o recorde feminino, da representante da então União Soviética Galina Chistyakova, é de 7,52 m, obtido em 1988. Esses

valores são significativamente abaixo do que seria esperado se a decolagem ocorresse a 45° (mais adiante discutiremos qual o melhor ângulo para o salto em distância).

Uma análise equivalente pode também ser feita em relação ao salto em altura (sem vara): lançando-se a um ângulo mais adequado, a altura alcançada poderia ser bem maior do que os recordes atuais, de 2,45 m para homens (marca conquistada pelo cubano Javier Sotomayor, em 1993) e 2,09 m para as mulheres (recorde da atleta búlgara Stefka Kostadinova, em 1987) registrados (IAAF 2012). Correndo a uma velocidade horizontal de 35 km/h, se ela pudesse ser convertida em uma velocidade vertical, a altura que o centro de massa subiria poderia exceder os impressionantes 5 metros, como ficará claro mais adiante. Somando-se a altura inicial do centro de massa do atleta, a altura máxima poderia atingir seis metros. Essa altura é conseguida apenas nos saltos com vara, modalidade na qual a vara, que é bastante elástica, permite converter uma velocidade horizontal em uma velocidade vertical sem alterar sua intensidade, uma vez que há conservação da energia mecânica durante todo o movimento do ou da atleta.

Como os saltos em distância estão aquém dos dez metros e os saltos em altura (sem vara) muito aquém dos cinco ou seis metros, podemos concluir que alguma coisa impede que os atletas decolam formando ângulos muito grandes com a horizontal ou, em outras palavras, consigam converter uma grande parte das velocidades adquiridas nas corridas que precedem os saltos em velocidades verticais. Mas o que impede os atletas de converterem suas

velocidades horizontais em velocidades que tenham uma direção mais adequada para realizar os saltos? Foi essa a pergunta que apareceu na revista *American Journal of Physics*, que circula internacionalmente entre a comunidade de físicos.

As respostas qualitativas que surgiram para essa pergunta nos números seguintes da mesma revista estavam corretas: os atletas não conseguem mudar a direção de suas velocidades porque não podem gerar a energia necessária para isso. Mas, por que não? Afinal, se a intensidade da velocidade não muda, apenas a direção é que muda, a energia cinética permanece inalterada. Então, por que é necessário gastar energia para mudar a direção da velocidade?

Essas perguntas sugerem outras. Por que um atleta que pretende saltar verticalmente – salto em altura – corre horizontalmente? Afinal, se o objetivo é saltar verticalmente, o que uma velocidade horizontal pode contribuir para isso? Em uma primeira análise, parece que correr antes do salto em altura serviria apenas para cansar o ou a atleta e piorar o desempenho.

Afinal, quais são os ingredientes realmente importantes para os saltos?

Não podemos permitir que um problema complexo se transforme em um problema confuso

Como em quase todos os problemas em ciências, os saltos em altura e distância têm uma quantidade muito grande de detalhes envolvidos – e muitos detalhes transformam um problema a ser resolvido em alguma coisa muito complicada. Portanto, se não tomarmos cuidados, corremos o risco de torná-lo confuso. Isso deve ser evitado com todas as forças: transformar um problema complexo e complicado em um problema confuso é o primeiro passo para não resolvê-lo.

Esse problema foi examinado em colaboração com o professor Marcelo Takeshi Yamashita, do Instituto de Física Teórica da Unesp, e o primeiro passo foi identificar os aspectos mais importantes dos saltos. Tanto no salto em altura como no salto em distância, um dos momentos cruciais é o empurrão que é dado no exato instante em que

o salto se inicia, isto é, na última passada. Portanto, uma questão é entender esse empurrão: o que o caracteriza?

Examinando alguns detalhes da corrida de 100 m rasos e do levantamento de peso, pudemos entender o que caracteriza esse empurrão: a energia que o atleta consegue produzir com ele e que aumenta a energia cinética de seu movimento. Para estimar essa energia, tomamos como referência essas duas modalidades esportivas.

Mas faltava resolver outra questão: para que um atleta corre horizontalmente quando quer saltar verticalmente? A solução para essa pergunta tem a ver com a conservação de momento angular e serviu, também, para entender a curva fechada que os atletas fazem antes do salto.

Os resultados obtidos foram publicados na mesma revista onde a questão inicial surgiu (Helene e Yamashita 2005). Neste artigo, apresentaremos uma visão geral do modelo e uma tentativa de ligar o tema a questões fisiológicas.

O empurrão final

Suponha um atleta que esteja correndo horizontalmente e pretenda saltar uma longa distância. Se ele tivesse um excelente mecanismo elástico e tivesse um apoio adequado para seus pés, poderia transformar a velocidade horizontal em vertical sem necessidade de nenhum esforço. A Figura 1A ilustra como isso poderia acontecer em uma situação idealizada. Uma bola, por exemplo, deslocando-se horizontalmente, choca-se com uma cunha; se o choque for totalmente elástico a energia cinética da bola antes e depois do choque é a mesma. Se a cunha tiver um ângulo adequado, a bola será “refletida” formando um ângulo de 45° com a horizontal. Essa seria uma situação ideal para o salto em distância. Para o salto em altura, a bola deveria ser refletida em um ângulo de 90° . Mas essas coisas não ocorrem com pessoas. Embora tenhamos alguma elasticidade, ela é muito pequena. Assim, se queremos ganhar uma velocidade vertical, precisamos fazer algum esforço, empurrando o chão para baixo.

E isso é o que parece ocorrer com atletas: imediatamente antes do salto, eles dão um empurrão final contra o chão. E esse empurrão é a origem da velocidade vertical



Figura 1. Uma bola deslocando-se horizontalmente, ao se chocar com uma cunha, poderia ter a direção de sua velocidade alterada, sem alterar seu módulo nem exigir produção de energia. Na figura da esquerda, uma bola deslocando-se horizontalmente teria sua velocidade mudada para uma direção formando 45° com a horizontal, ideal para se deslocar uma distância máxima na horizontal antes de cair no chão. A figura da direita mostra uma situação ideal para um atleta que queira saltar em altura: transformar sua velocidade horizontal em uma totalmente vertical sem alterar seu módulo. Mas atletas não são de borracha nem totalmente elásticos; portanto, não podem alterar a direção de suas velocidades por um processo como o descrito aqui.

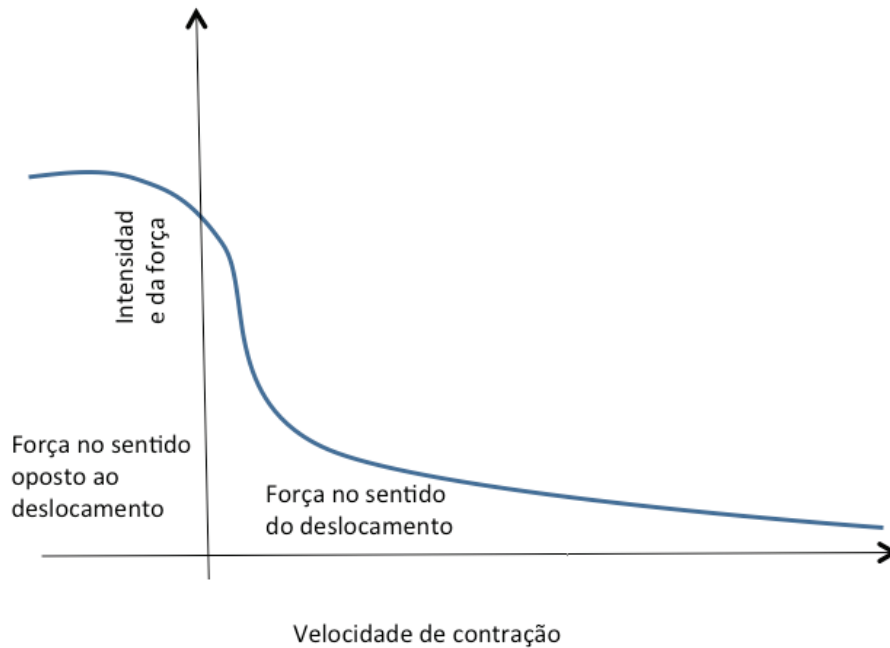


Figura 2. A força que conseguimos aplicar depende da velocidade de contração dos nossos músculos: quanto maior a velocidade de contração (no sentido da força), menor a força que podemos aplicar. Quando a força é aplicada no sentido oposto ao deslocamento (seguramos alguma coisa, evitando seu movimento), a força que conseguimos fazer é maior do que a força que podemos fazer sem movimento algum. Esta figura representa qualitativamente esse efeito.

que adquirem, seja no salto em altura, seja no salto em distância. Como é esse empurrão – do ponto de vista da Física, mas sem descuidar da Fisiologia? Essa é uma questão relevante. Poderíamos pensar, por exemplo, que esse empurrão é caracterizado por uma força constante e estimar a força máxima que um atleta consegue fazer com as pernas; então, bastaria calcular a aceleração vertical proporcionada por essa força, estimar a distância pela qual ela atua e calcular a velocidade vertical ganha pelo atleta. Mas isso é razoável? Somos capazes de fazer uma força muito intensa, empurrando alguma coisa sem deslocamento. Se a força é contra o deslocamento, ou seja, empurramos uma coisa que está vindo em nossa direção ou seguramos uma coisa que está se afastando, a força que conseguimos fazer é ainda maior do que aquela que fazemos sem provocar deslocamento algum. (O artigo *Papel das ações musculares excêntricas nos ganhos de força e de massa muscular*, neste volume, discute nossa capacidade de aplicação de força e execução de trabalho.)

Mas quando há deslocamento no mesmo sentido da força que aplicamos, como quando saltamos, a força que podemos fazer pode ser bem menor do que naqueles dois casos anteriores. Imagine a seguinte situação. Uma pessoa está empurrando um carro quebrado enquanto ele está parado; ela pode fazer uma força muito intensa e, dependendo do local que empurrar o carro, pode até mesmo amassá-lo. Mas quando o carro começa a andar, a força que conseguimos fazer é menor, diminuindo na medida em que a velocidade do carro aumenta. Ou seja, o que limita nossa ação não é apenas a força que conseguimos aplicar a alguma coisa, mas, também, a potência ou a energia produzida por ela. Isso é bem conhecido e

estudado pelos fisiologistas: a força feita por nossas fibras musculares depende da velocidade de contração. Quanto mais rápida a contração de um músculo, menor a força que ele pode gerar.

Então, para caracterizar o empurrão final que um atleta dá imediatamente antes do salto, em lugar de supor uma força estática, precisamos considerar, também, o deslocamento. Ou, melhor ainda, devemos considerar o trabalho feito por esse empurrão. Se soubermos qual é esse trabalho, saberemos a energia cinética adicionada ao corpo do atleta e, algumas contas a mais, a sua velocidade vertical ao decolar para o salto. Para isso, podemos analisar, por exemplo, o levantamento de peso na forma de agachamento (“squat”). Nessa modalidade, um atleta consegue, em movimento, quer dizer, levantando o peso, fazer uma força de aproximadamente 3.000 N com uma única perna. Se ele faz essa força por 25 cm, que é uma boa estimativa da distância que o atleta empurra seu corpo para cima no último passo antes de iniciar o salto, o trabalho dessa força (que é igual ao produto dela pela distância de aplicação), é

$$(3.000 \text{ N} - 800 \text{ N}) \times 0,25 \text{ m} = 550 \text{ J} \quad , (1)$$

onde os 800 N subtraídos corresponde a uma estimativa do peso do atleta suportado por apenas uma perna, aquela que dá o empurrão final. Esse trabalho levará a um aumento da energia cinética do mesmo valor.

Uma outra maneira de estimar essa energia adicionada ao movimento do atleta é examinar a corrida de cem metros rasos. A maior potência mecânica produzida por um atleta nos cem metros rasos ocorre quando ele está

com uma velocidade de cerca de 6 m/s e uma aceleração da ordem de 5 m/s² (Helene e Yamashta 2010). Isso corresponde a uma potência, no caso de um atleta de 80 kg, igual a

$$80 \text{ kg} \times 5 \text{ m/s}^2 \times 6 \text{ m/s} = 2.400 \text{ W}$$

Mas essa não é toda a potência mecânica que um atleta produz, pois durante a corrida há um gasto constante de energia estimado em cerca de 200 W (Helene e Yamashita 2010) (sobre esse tema, veja, também, o artigo *Locomoção Terrestre e Demanda Metabólica*, neste volume). Assim, um excelente atleta consegue produzir, em uma única passada, considerando que o atleta dá uma passada a cada 0,2 s,

$$(2.400 \text{ W} + 200 \text{ W}) \times 0,2 \text{ s} = 520 \text{ J} \quad , (2)$$

Esse valor é bem próximo daquele estimado no caso de levantamento de peso, de 550 J. Assim, nós vamos supor que um atleta de alto nível, especialista em saltos, consiga, com um único empurrão dado por uma de suas pernas, produzir uma energia mecânica de 550 J. (Não mudaria muito se supuséssemos algum outro valor próximo a esse, como os 520 J estimados pela corrida de cem metros rasos.) Vamos usar esse valor tanto para o salto em distância como em altura.

Salto em distância

Um bom atleta no salto em distância é também um bom corredor. Como é mostrado no trabalho *Uma breve análise da física da corrida de 100 metros rasos*, neste volume, um bom corredor atinge, após trinta metros de corrida, uma velocidade da ordem de 10 m/s que, vamos supor, é a velocidade com que um saltador atinge no momento do salto. Supondo uma massa de 80 kg, sua energia cinética será de

$$m \cdot v^2 / 2 = 4.000 \text{ J} \quad , (3)$$

correspondendo a um movimento horizontal. Se ele adiciona 550 J à sua energia cinética, na forma de uma velocidade vertical, sua energia cinética passa a ser de 4.550 J e a nova velocidade, v' , será dada por

$$m \cdot v'^2 / 2 = 4.550 \text{ J} \quad , (4)$$

A velocidade, para um atleta de 80 kg, será, então, de 10,66 m/s. Como essa velocidade é adicionada em uma direção perpendicular à velocidade original, o diagrama vetorial das componentes da velocidade será aquele indicado na Figura 3, correspondente a uma velocidade vertical de 3,7 m/s. Da análise da figura 3 concluímos, também, que o ângulo de decolagem do atleta é da ordem de 20°.

Com esses resultados, podemos calcular a distância do salto. Um objeto lançado do nível do solo com velocidade horizontal v_h e velocidade vertical v_v cairá a uma distância do ponto de lançamento dada por

$$d = \frac{2 \cdot v_v \cdot v_h}{g} \quad , (5)$$

onde g é a aceleração da gravidade. (Esta última equação é obtida considerando-se que a velocidade horizontal não é alterada enquanto o movimento vertical é uniformemente acelerado para baixo correspondendo a um exercício típico do ensino médio.) Substituindo os valores numéricos, temos

$$d = \frac{2 \cdot 3,7 \text{ m/s} \cdot 10 \text{ m/s}}{9,8 \text{ m/s}^2} = 7,6 \text{ m} \quad , (6)$$

Essa distância corresponde à distância L3 da Figura 4, ou seja, a distância horizontal percorrida pelo centro de massa do atleta desde o instante de decolagem até o momento que ele encosta seus pés no chão. Mas como o que conta no salto é a distância entre o último ponto no qual o atleta tocou o solo antes do salto e o ponto em que ele toca o solo ao cair, e não a distância que o seu centro de massa percorre, devemos adicionar àquele valor a distância L1+L2 da Figura 4, que podem, empiricamente, ser estimadas em 0,8 m (Helene e Yamashita, 2005). Portanto, a distância saltada é (7,6+0,8) m=8,4 m.

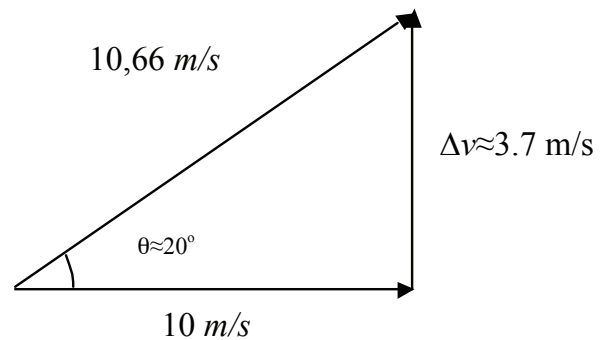


Figura 3. Componentes da velocidade no instante da decolagem no salto em distância.

Conclusão: um excelente atleta salta 8,4 m e decola formando um ângulo de 20° com a horizontal. Esses resultados parecem bastante bons: as distâncias saltadas por atletas de elite estão entre 7,4 m e 8,8 m para homens e 6,5 m e 7,5 m para mulheres. Os ângulos de decolagem observados estão entre 18° e 22° (Wakai e Linthorne 2005). Parece, portanto, que o modelo simplificado é razoável e descreve as características mais importantes do salto em altura. Se quiséssemos um resultado mais preciso, precisaríamos estudar as características de cada atleta em particular: quão intensa é a força que consegue fazer quando há deslocamento na mesma direção da força, como ocorre no empurrão final, a velocidade horizontal que ele ou ela atinge imediatamente antes do salto, as distâncias L1 e L2 da Figura 4 (que podem depender da altura do atleta), o peso do ou da atleta etc. Esses detalhes devem ser levados em consideração em estimativas mais precisas. Entretanto, o que importa é que, parece, estamos na direção correta se o que queremos é estimar as principais características que limitam o desempenho de atletas.

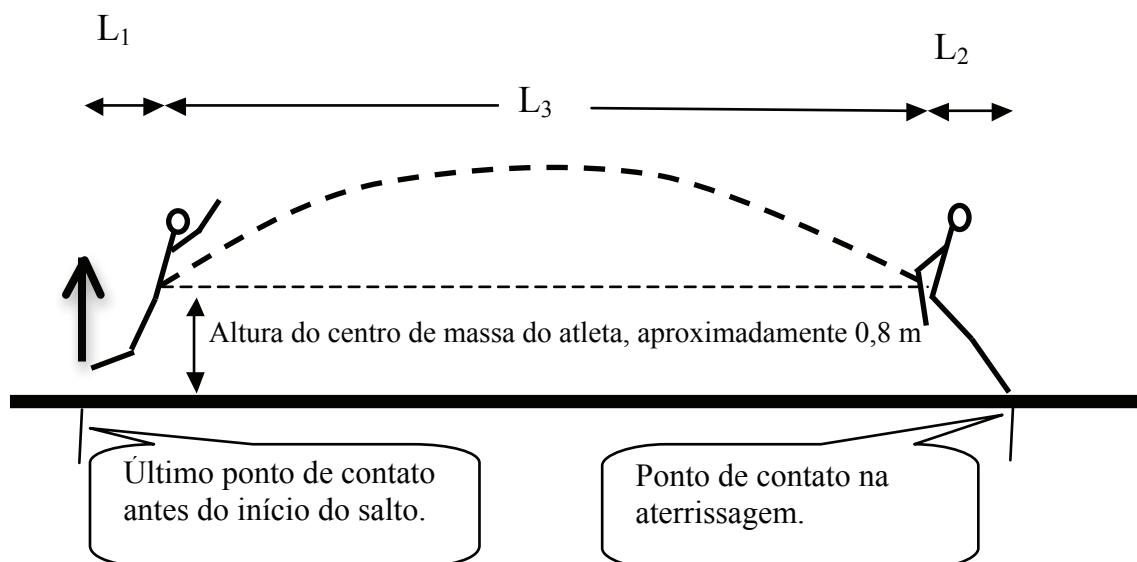


Figura 4. Esquema de um salto em distância. Para iniciar o salto, o atleta dá um forte empurrão na vertical, cuja energia total produzida é da ordem de 550 J (indicado pela flecha grossa à esquerda). Esse empurrão fornece uma velocidade vertical para o atleta.

Salto em altura

No salto em altura há, além do empurrão final que o atleta dá para ganhar velocidade vertical, outro ingrediente, cuja origem é a lei de conservação do momento angular, usado pelo atleta para transformar parte da velocidade horizontal em uma velocidade vertical. Esse mecanismo não só explica a curva que o atleta faz imediatamente antes do salto (essa técnica, popularizada pelo salto do atleta americano Dick Fosbury em 1968, nos jogos Olímpicos da Cidade do México, é adotada desde então), mas, também, juntamente com a energia adicional de 550 Joules, explica a altura total atingida. Vale a pena procurar na rede de computadores um vídeo de um salto em altura para ver como é essa curva fechada que é feita pelos e pelas atletas antes do salto ou, melhor ainda, procurar um local de treinamento de atletas de verdade, ao vivo e em cores.

Antes de examinarmos o empurrão final que antecede a decolagem, vamos ver como é possível mudar a direção de uma velocidade inicialmente horizontal em uma nova direção, sem usar nenhum mecanismo de elasticidade. Suponha uma barra se deslocando horizontalmente e inclinada, como ilustrado na Figura 5. (Mais adiante, veremos como um atleta pode, em um pequeno intervalo de tempo, manter seu corpo inclinado sem cair.) Em certo momento, um dos extremos da barra encontra um obstáculo, parando imediatamente. Como o momento angular se conserva (veja Apêndice), então a velocidade do centro de massa logo depois que a barra é parada pelo obstáculo é

$$v = \frac{3}{4} v_0 \sin(\theta) \quad , (7)$$

onde θ é o ângulo de inclinação da barra indicado na Figura 5. Essa nova velocidade tem uma componente vertical, para cima, igual a

$$v_v = \frac{3}{4} v_0 \sin(\theta) \cos(\theta) \quad , (8)$$

e uma velocidade horizontal dada por

$$v_h = \frac{3}{4} v_0 \sin^2(\theta) \quad , (9)$$

Ou seja, o ato de “travar” um dos extremos da barra transforma a velocidade, inicialmente apenas horizontal, em uma nova velocidade que passa a ter uma componente na vertical. Por exemplo, se esse ângulo for da ordem de 60°, a velocidade vertical será pouco maior do que 30% da velocidade original, antes do travamento.

Enquanto o bloqueio está presente, a barra gira em torno dele. Entretanto, se o bloqueio é retirado imediatamente após a barra bater nele, ela, a barra, passa a se deslocar na direção da nova velocidade.

Agora, vamos ver o atleta. Evidentemente, nenhum atleta conseguiria correr com o corpo inclinado para trás sem cair. Então, o que ele faz é uma curva bem fechada no final da corrida; nessa curva, seu corpo ficará inclinado para o centro da curva, exatamente para que ele não caia. É isso que permite que o atleta, pelo menos em um pequeno intervalo de tempo, assuma a mesma forma de uma barra que corre inclinada, fazendo com que ele adquira uma velocidade vertical.

Para finalizar as contas, precisamos considerar o acréscimo de velocidade conseguido com um empurrão final, que adiciona 550 J à energia cinética do atleta, e calcular a altura máxima que seu centro de massa subirá. Essa altura é dada pela distância que um objeto sobe em um campo gravitacional quando lançado verticalmente para cima. Considerando também a geometria do sistema da Figura 5B, que mostra que o centro de massa do atleta no momento do salto está a uma distância $l \cdot \sin(\theta)/2$ do solo, a altura final do centro

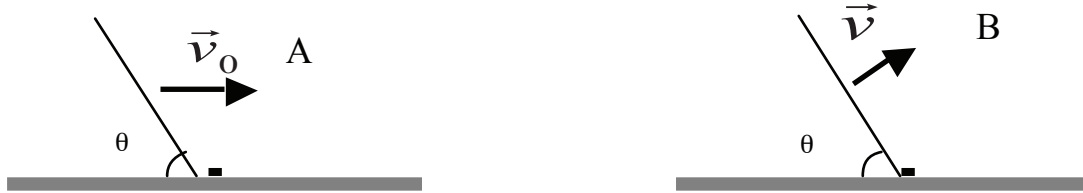


Figura 5. Uma barra deslocando-se horizontalmente com velocidade v_0 é instantaneamente “travada” quando um dos seus extremos encontra um bloqueio. O momento angular em relação ao ponto de travamento é conservado e a barra passa a girar em torno dele com uma nova velocidade v .

de massa é

$$h = \frac{1}{2g} \left(v_v^2 + \frac{2}{m} 550J \right) + \frac{l}{2} \text{sen}(\theta) \quad , (10)$$

Estimando $l/2$ como sendo 1 m e substituindo nesta última equação a expressão para a v_v da equação (8), temos uma expressão que relaciona a altura do salto com a velocidade com que o atleta se aproxima e o ângulo de inclinação. Vamos considerar que a velocidade típica de atletas ao se aproximarem da barra está entre 7 m e 8 m para homens e 6 m a 7,5 m para mulheres (IAAF 2012) e aproximar v_0 por 7,5 m/s. Neste caso o ângulo θ ideal (aquele que maximiza h) é 56° .

A Figura 6 mostra a situação no instante do salto. O atleta sobe com uma velocidade vertical de 4,5 m/s, que é uma combinação da velocidade vertical conseguida ao travar o pé (2,6 m/s) mais a velocidade adicionada pelo empurrão de 550 J. A velocidade total tem intensidade de 5,9 m/s e, portanto, o ângulo de decolagem indicado na Figura 6 é da ordem de 49° .

Com essas informações concluímos que a altura do salto é da ordem de 2,0 m, um valor bastante típico para atletas de ponta. O ângulo de decolagem, de 49° , é também bastante próximo dos ângulos típicos que os e as atletas decolam no salto em altura (Dapena e Chung 1988).

Discussão

Em alguns casos, analisar as grandezas físicas importantes em uma atividade esportiva pode ser relativamente fácil.

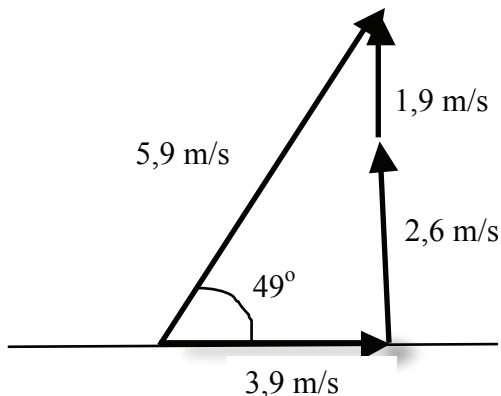


Figura 6. No exato momento que o atleta decola, sua velocidade vertical é de 4,5 m/s. Essa velocidade corresponde à soma da velocidade de 2,6 m/s que ele consegue ao “travar” o pé e transformar parte de sua velocidade horizontal em velocidade vertical com a velocidade ganha no empurrão final.

Talvez o salto com vara seja o mais simples deles, no qual a energia cinética acumulada pelo ou pela atleta na corrida é transformada em energia potencial da vara quando ela é flexionada. Em seguida, essa energia potencial é usada para “lançar” o ou a atleta para cima, transformando-se em energia cinética. Finalmente, o corpo do ou da atleta sobe e a energia cinética é gradativamente transformada em energia potencial gravitacional. Mas em outras atividades esportivas, vários outros aspectos mais sutis podem ser importantes. Descobrir quais são eles é, então, a chave para entender e analisar a atividade.

Um critério comumente usado nas várias áreas científicas para saber se a análise feita pode ser correta ou não é comparar os resultados previstos com a realidade. Com esse critério, parece que a interpretação que fizemos dos saltos em altura e distância está na direção correta, ou seja, os ingredientes mais relevantes foram identificados. Afinal, conseguimos prever distâncias e alturas saltadas, os ângulos de decolagem dos atletas nessas duas modalidades e encontrar uma justificativa para a curva fechada que o atleta faz antes de um salto em altura.

Um aspecto fundamental é quanto ao empurrão final que um atleta deve dar no instante de decolagem, tanto no salto em altura como no salto em distância. A hipótese adotada é que o que caracteriza esse empurrão é a energia produzida, não a força ou o impulso (o impulso é a força multiplicada pelo tempo e provoca uma variação da quantidade de movimento). Em ambos os casos, a energia é adicionada na forma de energia cinética, com uma variação da velocidade na direção e no sentido mais adequados para que o desempenho seja o melhor possível. Essa energia, estimada em 550 J, é a máxima energia mecânica produzida por um atleta com apenas uma de suas pernas em qualquer modalidade esportiva, seja essa atividade os saltos em altura e distância, a corrida de cem metros rasos ou o levantamento de peso.

Aqui vão duas observações finais. Uma delas é prática. De fato, no salto em altura o modelo que usamos, de travar o pé, é apenas uma aproximação do que efetivamente os atletas fazem. Parece que esse processo de transformar velocidade horizontal em vertical não ocorre em apenas um exato instante no qual o pé é travado, como supusemos, simplificada, no modelo, mas em um movimento mais complexo. Mesmo dessa forma mais complexa, a força exercida sobre o pé do atleta (o pé de chamada, no jargão atlético) no último passo é muito intensa. Isso exige sapatilha especial, com travas, para suportar a força exercida (essa sapatilha, por sinal, pode

ser usada apenas no pé que sofrerá essa força). Como essa força exercida é muito intensa, o atleta deve tomar muito cuidado para evitar lesões graves.

Referências

- IAAF 2012. International Association of Athletics Federations, iaaf.org.br, sítio consultado em outubro/2012
- Harris WD 1997. Question #58. Is a good long jumper a good high jumper? American Journal of Physics 65: 105
- Helene O e Yamashita MT. 2005. A unified model for the long and high jump, American Journal of Physics 73 (10): 906-908
- Helene O e Yamashita MT. 2010. The force, power, and energy of the 100 meter sprint, American Journal of Physics 78 (3): 307-309
- Dapena J e Chung CS. 1988. Vertical and radial motions of the body during the take-off phase of high jump. Medicine and Science in Sports and Exercise 20: 290-302
- Wakai M e Linthorne NP, 2005. Optimum take-off angle in the standing long jump, Human Movement Science: 24, 81-96

Apêndice

Conservação do momento angular

Em referência à Figura 5A, o momento angular de uma barra de comprimento l deslocando-se com velocidade v_o em relação ao ponto P indicado naquela figura é

$$L_1 = m \cdot v_o \cdot \frac{l}{2} \cdot \text{sen}(\theta) \quad , (A1)$$

onde m é a massa da barra.

Após o choque (situação ilustrada na Figura 5B), o momento angular é dado por

$$L_2 = I \cdot \omega \quad , (A2)$$

onde I é o momento de inércia de uma barra em relação a um de seus extremos,

$$I = \frac{m \cdot l^2}{3} \quad , (A3)$$

e a velocidade angular ω relaciona-se com a velocidade v após o choque por

$$\omega = \frac{v}{l/2} \quad , (A4)$$

Como o torque em relação ao ponto P de qualquer força aplicada sobre a barra no seu extremo inferior é nulo (uma vez que essa força é aplicada exatamente no próprio ponto P), o momento angular se conserva. Assim, igualando L_1 a L_2 obtemos a equação (7).