P 1. Física en los encierros de San Fermín.

¿Pero, hay Física en los encierros? Claro que la hay, mucha y muy compleja. En este ejercicio se pretende poner de manifiesto algún aspecto físico de este popular festejo. Naturalmente, será necesario utilizar modelos muy simples; de lo contrario, el problema sería prácticamente irresoluble.

La longitud del recorrido del encierro, desde la salida de los corralillos de Santo Domingo hasta la entrada de la plaza de toros es de 848,6 m y la duración promedio de los últimos treinta años, es de 3,55 min.

a) Determine la velocidad media, V, de un toro en un encierro rápido y limpio como el del 8 de julio de 2008, cuya duración fue de 2 min 17 s.

Un tramo singular del encierro es la cerrada curva con la que se inicia la calle Estafeta. Su pavimento es prácticamente horizontal y allí los toros suelen derrapar dando lugar a situaciones peligrosas. La figura 1 es una fotografía a vista de pájaro de la famosa curva. En ella, superpuesta, se muestra la hipotética trayectoria de un toro y se supone que la curva es un arco de circunferencia de radio R.

b) Haga una estimación de R utilizando la escala que también se muestra en la fotografía.

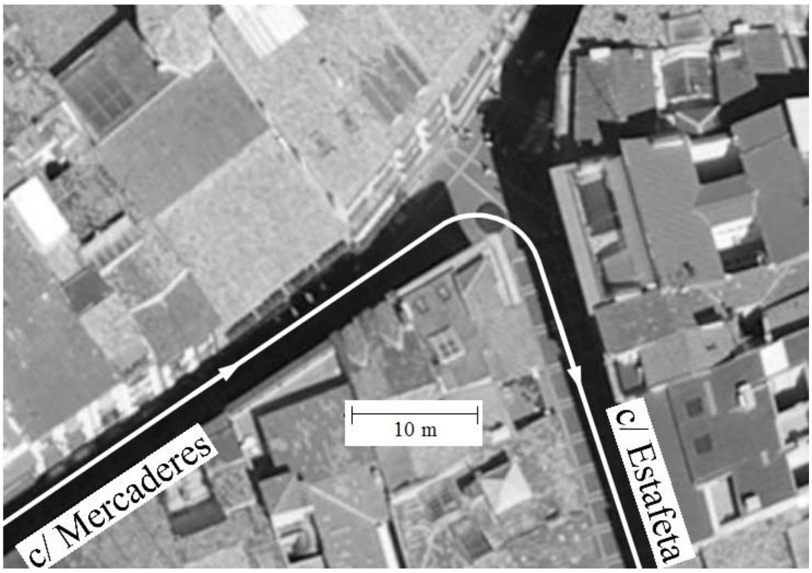
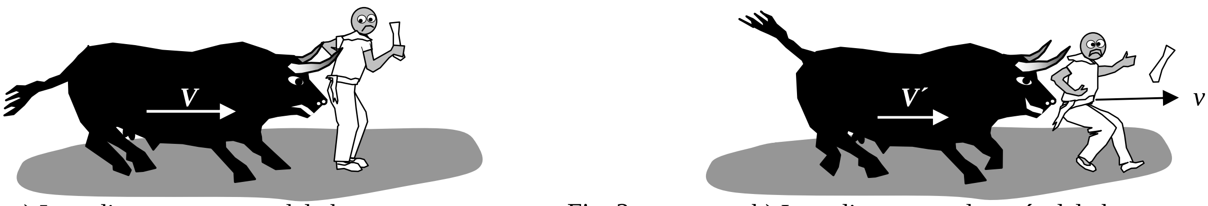


Fig. 1

Siendo coherentes con la "vista de pájaro" de la figura 1, podemos considerar al toro como una partícula puntual que traza la curva de la Estafeta con una velocidad de módulo constante V, la calculada en el apartado (a). Además, suponemos que el toro no llega a "derrapar" pero está en el límite, es decir, que no desliza por muy poco.

c) Con estos supuestos, haga una estimación del coeficiente de rozamiento μ entre las pezuñas del cornúpeta y el pavimento de la curva de la Estafeta.

Supongamos ahora que un toro de masa $M = 512$ kg (que visto de cerca no es precisamente una partícula puntual…) que se mueve con la velocidad V del apartado (a), embiste a un despistado forastero de masa $m = 75$ kg que se encontraba parado en la calle (no lo empitona, simplemente choca con él). Los dibujos a y b de la figura 2 corresponden respectivamente a los instantes inmediatamente anterior y posterior al choque y se supone que el intervalo de tiempo δt transcurrido entre ellos es muy corto. Como consecuencia del choque, la velocidad del toro se reduce en un 10 %.



a) Inmediatamente antes del choque Fig. 2 b) Inmediatamente después del choque

d) ¿Cuál es la velocidad v del forastero inmediatamente después del choque?

e) ¿Cuánto ha variado la energía mecánica del toro ΔE_{toro}? ¿Se transfiere ΔE_{toro} íntegramente al forastero? Razone su respuesta.

f) Si estimamos como "duración del choque" un tiempo $\delta t = 0,3$ s , ¿cuál es la fuerza media $\overline{F}$ con que el toro empuja al forastero durante el choque?

Solución

a) Como la longitud del recorrido es $L = 848{,}6$ m y el tiempo es $T = 2$ min 17 s $= 137$ s , la velocidad media es

$$\boxed{V = 6{,}19 \text{ m/s} = 22{,}3 \text{ km/h}}$$

b) Para medir el radio de curvatura de la "curva de la Estafeta", se puede trazar sobre la fotografía de la figura 1 del enunciado una circunferencia que se "ajuste" lo mejor posible a la trayectoria, como se muestra en la figura 3. Con una regla se mide el diámetro de dicha circunferencia y la longitud de la escala. El radio de curvatura R será

$$R = \frac{1}{2}\frac{\text{diametro}}{\text{Longitud de la escala}}10 = 5{,}0\,\text{m}$$

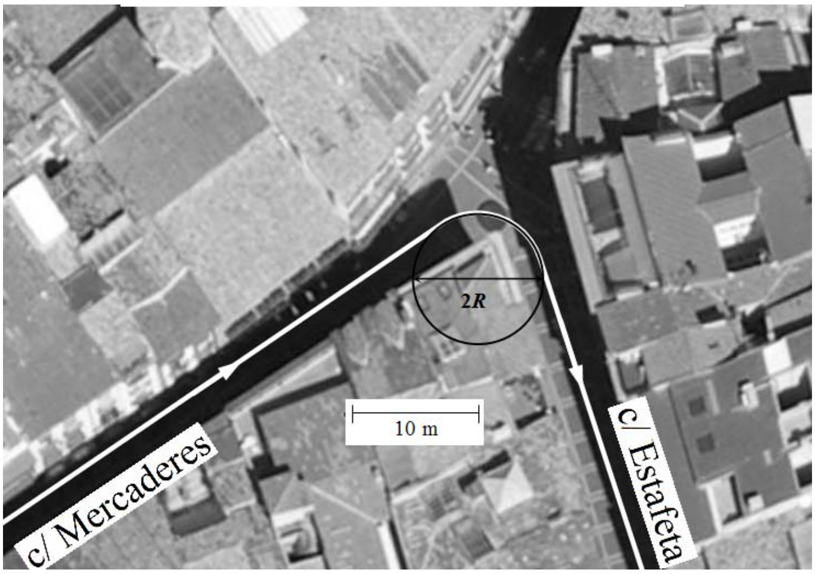


Fig. 3

c) El toro, considerado como una partícula puntual, describe una trayectoria circular con velocidad constante. En consecuencia, si llamamos F_r a la fuerza de rozamiento, se verificará

$$M\frac{V^2}{R} = F_r \qquad (1)$$

Si el toro no "derrapa" pero está en límite de hacerlo, la fuerza de rozamiento tiene que estar muy próxima a su valor máximo $F_r = \mu N = \mu Mg$, siendo M la masa del toro. Sustituyendo en (1), resulta

$$M\frac{V^2}{R} = \mu Mg \quad \Rightarrow \quad \boxed{\mu = \frac{V^2}{gR}} \quad \Rightarrow \quad \boxed{\mu = 0{,}78}$$

d) Considerando como sistema mecánico al conjunto toro-forastero, en el proceso del choque entre ambos actúa como fuerza exterior, paralela al suelo, la fuerza de rozamiento. Luego, en la dirección horizontal, no se conserva el momento lineal del sistema. Si llamamos P_i y P_f a los momentos lineales inicial y final del sistema, el teorema del impulso permite escribir

$$P_f - P_i = I$$

Donde $P_i = MV$, $P_f = MV' + mv$ e $I = \int_0^{\delta t} F_r\, dt$

siendo m la masa del forastero, V' y v las velocidades del toro y del forastero después del choque.

Ahora bien, aunque la fuerza de rozamiento puede variar en el intervalo de tiempo δt, nunca puede llegar a superar su valor máximo. Por ello y teniendo en cuenta el pequeño valor de δt que indica el enunciado, su impulso puede considerarse nulo y entonces resulta que

$$P_f - P_i \approx 0 \quad \Rightarrow \quad MV = MV' + mv$$

O lo que es igual,

$$\boxed{v = \frac{M}{m}\left(V - V'\right)}$$

Como el enunciado nos dice que "la velocidad del toro se reduce en un 10 %, se tiene que

$$\frac{\left(V - V'\right)}{V} = 0{,}1$$

Y teniendo en cuenta las masas de los protagonistas del choque, el módulo de la velocidad del forastero resulta

$$\boxed{v = 0{,}68\,V = 4{,}2 \text{ m/s}}$$

e) Dado que todo el proceso se lleva a cabo sin variación apreciable de energía potencial gravitatoria, la variación de la energía mecánica del toro es

$$\boxed{\Delta E_{toro} = \frac{1}{2} M \left(V'^2 - V^2\right)}$$

Naturalmente es negativa, ya que $V' = 0{,}9\,V$, (el toro tiene que perder energía). En valor absoluto la perdida es

$$\boxed{\Delta E_{toro} = 1{,}9 \text{ kJ}}$$

¿Se transfiere ΔE_{toro} íntegramente al forastero? No, el toro no es un "sólido rígido". En el breve "encuentro" con el forastero sufrirá alguna deformación que conlleva trabajo de las fuerzas interiores. Este trabajo se realiza a expensas de una fracción de la energía mecánica del cornúpeta.

Si se considera ahora al forastero como sistema mecánico, durante el corto tiempo δt que dura el choque, actúa como fuerza externa la que ejerce el toro sobre el sufrido forastero. Esta fuerza es nula antes y después del choque pero no lo es durante los $\delta t = 0{,}3\ s$ que dura el encontronazo. Es pues una fuerza de percusión $F(t)$ que puede llegar a tener valores muy altos en el intervalo de tiempo δt. El impulso de esta fuerza es igual a la variación del momento lineal del forastero que es mv, por lo tanto

$$mv = \int_0^{\delta t} F(t)\, dt$$

f) Si sustituimos $F(t)$ por su valor medio en el intervalo δt,

$$mv = \int_0^{\delta t} \overline{F}\, dt = \overline{F} \int_0^{\delta t} dt \quad \Rightarrow \quad \boxed{\overline{F} = \frac{mv}{\delta t}} \quad \Rightarrow \quad \boxed{\overline{F} = 1{,}1 \cdot 10^3 \text{ N}}$$