

L'escombra equilibrista

Experiència

Només cal disposar d'una escombra (o un pal de fregar o un bastó d'esquí o qualsevol objecte allargat que no sigui simètric).

L'experiència consisteix en el següent: aguantem l'escombra pels dos extrems amb totes dues mans (sense agafar-la), tal com es veu a la figura 1, i aleshores movem les mans horitzontalment, de manera lenta i simultània, desplaçant-les cap al mig de l'escombra, fins que es trobin just davant la cara.



Figura 1

Abans de portar-ho a la pràctica és interessant explicar-ho al públic i demanar que facin una hipòtesi sobre el que passarà; quasi tothom (tant l'estudiantat com el públic en general) prediu, amb certa lògica, que l'escombra caurà del costat del raspall, argumentant que és el costat de l'escombra que pesa més.

Seguidament passem a fer l'experiència i, de manera sorprenent, observem que en el moment en què les dues mans s'han trobat al mig, l'escombra ha quedat en perfecte equilibri horitzontal.

És millor demanar a la persona que ho fa que tanqui els ulls per posar en evidència que no hi intervé de manera intencionada per aconseguir el resultat final.

Podem repetir l'experiència amb diferents tipus d'escombra, amb només el pal de l'escombra, amb una pal de fregar sec, amb el mateix pal de fregar moll (perquè pesi més)... En tots els casos, en ajuntar les mans l'objecte queda en equilibri: sempre en trobarem de manera exacta el centre de gravetat.

Explicació

L'explicació la podem fer a dos nivells: per a la gent del carrer o per a l'estudiantat de física (quan estigui treballant el concepte de fricció).

Per a la gent del carrer

En aquest apartat hi ha incorreccions físiques (assenyalades en cursiva) que considerem prou justificades per poder explicar aquesta experiència al públic en general.

Només cal explicar que *la fricció depèn del pes* i que, com que inicialment la mà dreta nota *menys pes*, la fricció és menor, de manera que l'escombra llisca. A la mà esquerra notem *més pes* i per tant hi ha més fricció, que és la responsable que l'escombra es mogui.

A mesura que l'escombra llisca sobre la mà dreta, notem *més pes* sobre aquesta mà i arribarà un moment que totes dues mans notaran el *mateix pes* i, per tant, tindran la mateixa fricció. A partir d'aquest moment l'escombra lliscarà igual (amb la mateixa fricció) sobre ambdues mans fins a trobar-se en el punt d'equilibri de l'escombra (centre de gravetat).

Per a l'alumnat

L'explicació del fenomen està relacionada amb la força de fricció, que sabem que depèn de la força normal ($F = \mu \cdot N$). En el nostre cas, la força normal correspon a la força que fa la mà sobre l'escombra (els profans en diuen el *pes*, però els estudiants —bons— de física saben que el pes de l'escombra no varia en cap cas i que s'aplica en el centre de gravetat).

També cal recordar que hi ha dos tipus de fricció:

Fricció estàtica. En aquest cas no hi ha lliscament entre els objectes i el valor de la força de fricció estàtica no pot superar el valor $\mu_e \cdot N$. Per tant, la força de fricció estàtica pot tenir un valor entre 0 i $F_{emàx} = \mu_e \cdot N$. Si supera aquest valor es produeix el lliscament i la força de fricció l'hem de considerar cinètica.

Fricció cinètica. S'esdevé en les situacions en què hi ha lliscament entre dues superfícies. El seu valor és $\mu_c \cdot N$.

Els coeficients μ_e i μ_c depenen únicament de les característiques de les superfícies que estan en contacte (en el nostre cas, la fusta del pal i la pell de la mà). En la realitat s'observa sempre que $\mu_e > \mu_c$, però, per simplificar l'explicació del fenomen (sobretot pensant en l'alumnat de batxillerat), a partir d'ara suposarem que $\mu_e = \mu_c$.

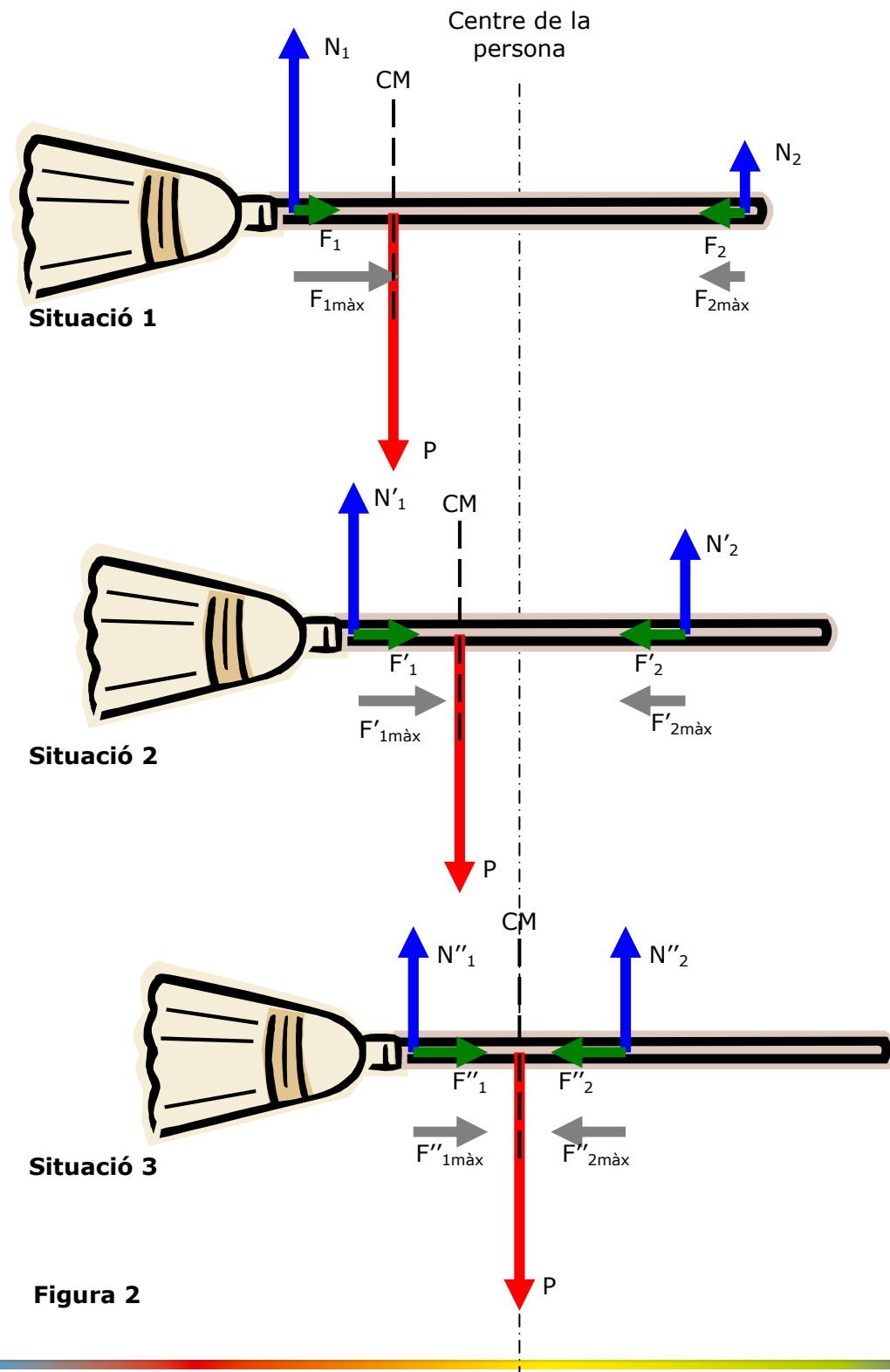
Tornem ara a la nostra escombra. Tal com podem observar en els dibuixos de la figura 2, hem de tenir presents totes les forces que s'apliquen sobre l'escombra:

- **P**, el pes de l'escombra causat per l'atracció gravitatòria entre la Terra i l'escombra ($P = m \cdot g$) i aplicat al centre de masses de l'escombra CM.
- **N₁** i **N₂**, força normal (perpendicular a la superfície) que fa cada mà sobre l'escombra, $N_1 + N_2 = P$; s'aplica als punts de l'escombra que estan en contacte amb les mans.

- F_1 i F_2 , força de fricció (estàtica o cinètica) que fa cada mà sobre l'escombra, que s'aplica als punts de l'escombra que estan en contacte amb les mans.

També representem els vectors $F_{1m\grave{a}x}$ i $F_{2m\grave{a}x}$, que són les forces de fricció estàtica màxima, $F_{1m\grave{a}x} = \mu_e \cdot N_1$ i $F_{2m\grave{a}x} = \mu_e \cdot N_2$, malgrat que no corresponen a forces reals sinó als valors màxims que poden arribar a valer les forces de fricció estàtiques.

Cal tenir present que només representem les forces que actuen sobre l'escombra. Evidentment, sobre les nostres mans o sobre el planeta Terra també actuen forces (de reacció), però per analitzar el moviment de l'escombra no ens interessen i, per tant, no les dibuixem.



Com a primera observació ens adonem que les forces verticals (N_1 , N_2 i P) sempre s'anul·len entre elles i, per tant, l'escombra no té moviment en aquesta direcció. Així, doncs, el moviment horitzontal de l'escombra solament és responsabilitat de les forces que actuen en aquesta direcció: les friccions.

En la primera situació, punt de partida, observem:

- ✓ Que $N_1 > N_2$, de manera que també $F_{1màx} > F_{2màx}$.
- ✓ En començar a fer forces iguals amb totes dues mans, la de la dreta (F_2) arriba primer a superar el valor màxim de la fricció estàtica; per tant, és la primera que passa a tenir valor de fricció cinètica $F_2 = \mu_c \cdot N_2$ (que hem considerat igual a l'estàtica màxima) i aleshores l'escombra llisca sobre la mà dreta.
- ✓ A la mà esquerra observem que la força $F_1 < F_{1màx}$, de manera que en aquest punt hi ha una fricció estàtica F_1 lleugerament superior a F_2 i sempre inferior al valor $F_{1màx}$. L'escombra no llisca en aquesta mà perquè $F_1 < F_{1màx}$.
- ✓ Cal tenir present que si l'escombra llisca amb una velocitat uniforme F_1 i F_2 han de ser iguals; en cas contrari es produiria una acceleració. De totes maneres les condicions i valors de les forces van canviant constantment i això dificulta encara més la resolució numèrica de la situació.

Per tant, encara que ajuntem les mans simultàniament, l'escombra no llisca sobre la mà esquerra i sí que ho fa sobre la dreta.

Si deixem evolucionar el sistema arribarem a la segona situació:

L'escombra s'ha anat desplaçant cap a la dreta mentre les mans ho feien simultàniament cap al centre de la persona. Observem:

- ✓ N_1 ha disminuït fins al valor N'_1 i N_2 ha augmentat fins al valor N'_2 . Recordem que la suma d'aquests valors sempre val P , però encara tenim $N'_1 > N'_2$.
- ✓ Com a conseqüència, $F'_{1màx} > F'_{2màx}$. Per tant, la fricció de la mà dreta continua superant el valor $F'_{2màx}$ i llisca amb una fricció cinètica F'_2 .
- ✓ La fricció F'_1 (inferior a $F'_{1màx}$) és igual al valor F'_2 i, per tant, l'escombra continua el seu moviment uniforme cap a la dreta.

Arribem així a la tercera situació:

- ✓ Les dues mans estan situades simètricament respecte al CM i aquest coincideix amb el centre de la persona.
- ✓ S'han igualat els valors de les forces normals $N''_1 = N''_2 = P/2$.
- ✓ Per tant, $F''_{1màx} = F''_{2màx}$, de manera que a partir d'aquest moment les dues forces de fricció són cinètiques: $F''_1 = F''_2$.

A partir d'aquesta situació, la suma de totes les forces que actuen sobre l'escombra és nul·la i, suposant que el moviment de l'escombra s'ha aturat un instant, l'escombra es manté quieta mentre les dues mans s'acosten simètricament fins al centre de la persona (recordem que ja coincideix amb el CM).

I una mica més complicat

Fins aquí hem simplificat l'explicació del fenomen considerant que els coeficients de fricció estàtica i cinètica són iguals ($\mu = \mu_e = \mu_c$); d'aquesta manera la força de fricció quan llisca l'escombra sobre una mà és $F = \mu \cdot N = F_{emàx}$. Segurament per a l'estudiantat de batxillerat ja està prou bé analitzar el fenomen fins a aquest nivell.

En la realitat, tenint present que $\mu_e > \mu_c$, el moviment és una mica més complicat perquè es produeix una alternança entre les forces de fricció estàtica i cinètica d'un costat i de l'altre. La sensació és que ara es mou una mica un costat, tot seguit s'atura i es mou una mica l'altre costat, i així successivament.

Analitzem amb més detall quan els coeficients són diferents: l'escombra llisca cap a la dreta fins que N_2 és superior a N_1 o, més concretament, fins que $\mu_c N_2 = \mu_e N_1$ (o, encara millor, fins que $\mu_c N_2 > \mu_e N_1$ perquè l'escombra ha de frenar i parar-se). Quan l'escombra s'atura, la mà dreta passa a experimentar fregament estàtic, que és clarament superior al fregament estàtic de la mà esquerra, i l'escombra es mou cap a l'esquerra (accelera un moment i després manté la velocitat constant) fins que el fenomen es repeteix.

Ara l'escombra llisca sobre la mà esquerra. N_1 va augmentant fins que arriba a ser superior a N_2 ..., i així es van alternant, de manera que el resultat és el moviment dreta-esquerra-dreta... que s'observa experimentalment.

Orientacions pel professorat

Alumnat al qual s'adreça l'experiència

- Alumnat d'ESO, batxillerat i també universitat, amb nivells d'aprofundiment diferents.

Metodologia

- Aquesta experiència està especialment indicada quan treballem el concepte de fricció (estàtica i cinètica). També és molt útil per explicar el concepte de composició de forces paral·leles.
- Aquesta experiència es fa en molt poc temps (5 minuts?), però la discussió del resultat pot portar més estona, especialment si ens entretenim en l'explicació dels diferents tipus de fricció, en el dibuix de totes les forces que hi intervenen, en la variació de les seves magnituds...
- També és una experiència que, com que és fàcil de fer, es pot posar com a tasca individual, incloent-hi la predicció, l'elaboració posterior de l'esquema de les forces... Després, a l'aula, plegats, podem fer-ne el comentari detallat.