

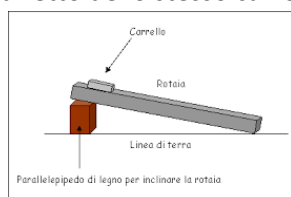
## Incontro del 23 marzo 2016

Il prodotto scalare viene utilizzato in fisica principalmente per calcolare il lavoro fatto da una forza o il flusso di un campo vettoriale attraverso una superficie. Vengono proposti alcuni semplici esperimenti quantitativi, parte dei quali eseguibili con una guida a cuscino d'aria o con un carrello a basso attrito, riguardanti il lavoro di una forza e le trasformazioni dell'energia. Sarà poi illustrato un procedimento per evidenziare il formarsi di correnti di Foucault ad opera di un magnete permanente in movimento e l'instaurarsi di una forza elettromotrice indotta in una bobina al variare del flusso del campo magnetico concatenato.

La guida a cuscino d'aria che, come è noto, viene utilizzata in ambito scolastico per studiare il moto di un carrello in condizioni di attrito pressoché nullo, è impiegata di solito con un cronometro digitale o con un sistema di acquisizione dati mediante PC. Purtroppo però, nella maggioranza dei casi il profilato che costituisce la guida non è perfettamente rettilineo ed i risultati ottenuti nelle misure mal si conciliano con la teoria. Si consiglia pertanto di eseguire gli esperimenti proposti rilevando i tempi con cronometri manuali, in modo che gli errori dell'apparato sperimentale si confondano con quelli dovuti ai riflessi degli operatori addetti alle misure.

## Misura del lavoro di sollevamento lungo un piano inclinato

L'esperimento consiste nella misura del lavoro necessario per trascinare un carrello lungo un piano inclinato in salita, affinché la sua quota aumenti di  $\Delta h$ , e nel confronto del risultato ottenuto con il lavoro necessario per il sollevamento diretto dello stesso carrello per il medesimo dislivello  $\Delta h$ .



La prova può essere condotta sia con una rotaia a cuscino d'aria sia con un carrello con ruote a basso attrito, (un vagoncino di un trenino debitamente zavorrato) montato su un supporto inclinabile (può essere lo stesso tavolo di lavoro con degli spessori sotto le zampe). La misura può essere svolta staticamente, seguendo la procedura indicata:

1. si livella la guida del carrello mobile con attrito trascurabile in modo che risulti il più possibile orizzontale;
2. si inclina la guida mediante uno spessore noto posto sotto uno (o una coppia) dei piedi e si prende nota della distanza tra il piede sollevato e quello opposto;
3. si misura con un dinamometro di portata adeguata il peso apparente del mobile sulla guida,  $F_{parall}$ , (attenzione al fatto che il dinamometro deve essere tarato nelle condizioni di misura, deve cioè segnare zero quando è posto in direzione parallela alla guida; se ciò non fosse possibile, sarà necessario montare una carrucola sull'estremità della guida per poter sostenere il carrello mobile mediante un filo agganciato al dinamometro in posizione verticale). Per effettuare una misura precisa sarà necessario percuotere leggermente l'apparato sperimentale per vincere gli attriti statici sul dinamometro, sull'eventuale carrucola e sul carrello, se provvisto di ruote;
4. si calcola il lavoro di sollevamento lungo il piano inclinato moltiplicando il peso apparente del carrello sulla guida con la distanza tra i piedi della guida stessa;
5. si misura il peso  $F$  del carrello appeso in verticale ad un dinamometro di portata adeguata e si calcola il lavoro di sollevamento diretto, moltiplicando il valore trovato per l'altezza  $\Delta h$  dello spessore inserito sotto al piede della guida: nei limiti degli errori di misura il valore trovato dovrebbe coincidere con quello determinato precedentemente. In alternativa, si può chiedere agli studenti di determinare, in base alla definizione studiata di "lavoro", quale sia il valore dello spessore inserito sotto il piede della guida.

A titolo esemplificativo si riportano i valori misurati in un esperimento realmente eseguito con una guida a cuscino d'aria avente una distanza tra i piedi  $\Delta S = 100$  cm:

- peso apparente del carrello sulla guida inclinata:  $F_{parall} = 0.072$  N ; poiché il dinamometro impiegato aveva un fuori zero di 0,010 N, il peso del carrello sul piano inclinato è stato stimato in 0.062 N
- Misura della massa del carrello impiegato  $m = 222$  g
- Peso del carrello  $F = 0.222 \times 9.8 = 2.17$  N
- lavoro di sollevamento lungo il piano inclinato  $L = F \Delta S = 0.62 \cdot 1 = 0.62$  J
- $\Delta h = 0.62 / 2.17 = 0.286$  m (il valore reale dello spessore era di 3,0 cm).

## Conversione dell'energia potenziale gravitazionale in energia cinetica

L'esperimento precedente può proseguire facendo misure atte a dimostrare la conservazione dell'energia meccanica. A questo scopo l'impiego della guida a cuscino d'aria garantisce risultati sufficientemente convincenti. Ciò che si vuol dimostrare è che un corpo che scivola su un piano senza attrito (in assenza cioè di forze dissipative) acquista mano a mano che scende la stessa velocità che avrebbe se transitasse per quella quota in caduta libera. Dal punto di vista operativo si procede come segue:

1. si pone il carrello sulla guida con la parte anteriore del carrello in corrispondenza del piede precedentemente sollevato con uno spessore;
2. si recluta una squadra di cronometristi il cui compito è quello di misurare il tempo impiegato dal carrello senza attrito per percorrere la distanza tra i due piedi; nell'ipotesi (più che ragionevole!) che il moto del carrello sia uniformemente accelerato, la velocità media ricavabile dalla misura coincide con la metà del valore della velocità assunta dal carrello quando arriva al secondo piede;
3. si esegue la misura più volte, al fine di stimare un valor medio e un'incertezza per il risultato della misura di tempo;
4. si calcola come detto prima il valore della velocità finale del carrello;
5. si confronta il valore di questa velocità con quello ricavabile dalla formula che descrive il moto di un grave in caduta libera con partenza da fermo  $v = (2 \cdot g \cdot h)^{1/2}$

Di seguito riportiamo i dati ottenuti in un esperimento eseguito nella situazione descritta:

- Spessore sotto il piede  $\Delta h = 3.0 \text{ mm}$
- Distanza tra i piedi  $\Delta S = 1,00 \text{ m}$
- Tempo medio misurato  $\Delta t = (2.6 \pm 0.3)\text{s}$ ,
- Velocità massima del carrello  $v = 2 \cdot \Delta S / \Delta t = 0.77 \text{ m/s}$
- Velocità finale di un grave che cade liberamente dalla quota  $\Delta h = 3.0 \text{ cm}$   $v = (2 \cdot g \cdot h)^{1/2} = 0.77 \text{ m/s}$

## Conservazione dell'energia meccanica (da potenziale a cinetica)

Anche questo esperimento presuppone l'impiego di una guida a cuscino d'aria o, almeno, un carrello su ruote a basso attrito. Si vuole fare una misura che dimostri come l'energia potenziale di una massa sospesa possa essere trasferita sotto forma di energia cinetica ad un carrello libero di muoversi senza attrito.

Operativamente si procede come segue:

1. si livella la guida a cuscino d'aria in modo che sia orizzontale;
2. si monta sull'estremità della guida cuscino d'aria una carrucola a basso attrito; attraverso la gola della carrucola viene fatto passare un filo di massa trascurabile che viene attaccato al carrello;
3. si appende all'altra estremità del filo una piccola massa; sotto la massa si pone uno sgabello sul quale la massa si poggerà, dopo una discesa di una ventina di cm. La lunghezza del filo deve essere tale che il carrello, una volta accelerato dalla massa in caduta, possa proseguire la sua corsa di moto uniforme per una distanza nota  $\Delta S$ , possibilmente lunga;
4. si recluta una squadra di cronometristi; questi dovranno misurare il tempo  $\Delta t$  impiegato dal carrello per percorrere la distanza nota  $\Delta S$  di cui al punto precedente;
5. si stabilisce un punto di partenza per il carrello e si misura la distanza  $\Delta h$  tra la massa appesa e il piano dello sgabello;
6. si lascia andare il carrello dal punto di partenza: quando il fronte del carrello dopo la fase di accelerazione passa per il primo traguardo vengono avviati i cronometri che verranno poi fermati al passaggio del carrello per il secondo traguardo;
7. vengono infine fatti i calcoli per determinare l'energia potenziale della massa sospesa  $E_{pot} = m \cdot g \cdot \Delta h$  e l'energia cinetica finale  $E_{cin} = \frac{1}{2} \cdot (M_c + m) \cdot v^2$ . La velocità finale viene determinata operando il rapporto tra la distanza  $\Delta S$  tra i traguardi e il tempo medio misurato  $\Delta t$ . Attenzione! Nel calcolo dell'energia cinetica compare la massa totale in movimento ovvero la somma della massa del carrello  $M_c$  e della massa sospesa  $m$ .

In un esperimento realmente eseguito si sono avuti:

- Massa sospesa  $m = 5\text{g}$
- Massa del carrello  $M_c = 222\text{g}$
- Altezza di caduta  $\Delta h = 0.24\text{m}$
- Distanza tra i traguardi  $\Delta S = 100\text{cm}$
- Tempo medio per percorrere  $\Delta S$  di moto uniforme  $\Delta t = (3.2 \pm 0.3)\text{s}$
- $v = 0.31\text{m/s}$
- Energia cinetica  $= 0.011\text{J}$
- Energia potenziale  $E_{pot} = m \cdot g \cdot \Delta h = 0.012\text{J}$

Si segnala la necessità di misurare correttamente l'altezza di caduta della massa che accelera il carrello. Se infatti la massa non ha dimensioni trascurabili occorre fare in modo che non si ribalti dopo aver raggiunto lo sgabello, altrimenti l'altezza di caduta risulterebbe sotto stimata.

Un secondo esperimento simile nelle modalità di esecuzione a quello appena descritto mette in primo piano la conversione dell'energia potenziale elastica di una molla tarata tesa in energia cinetica di un carrello lanciato dalla stessa molla lungo una guida orizzontale senza attrito. La molla, precedentemente tarata, viene ancorata ad un'estremità della guida e viene tesa per una distanza  $\Delta L$  nota mediante un filo piuttosto lungo attaccato al carrello. Quando il carrello viene rilasciato la molla gli imprime una velocità che viene rilevata con le stesse modalità già descritte al fine di verificare l'uguaglianza  $\frac{1}{2} \cdot k \cdot \Delta L^2 = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2$ .

## Trasformazione del lavoro meccanico in calore nel Calorimetro di Callendar.



Il calorimetro di Callendar è un apparecchiatura classica ideata per determinare l'equivalente meccanico della caloria. Nell'esperienza di Joule (1850) due pesi scendendo verso il basso mettevano in rotazione un mulinello immerso nell'acqua in un calorimetro. L'acqua contenuta nel calorimetro risultava riscaldata per effetto dell'attrito viscoso prodotto dal moto del mulinello e mettendo in relazione il salto di temperatura dell'acqua nel calorimetro con l'energia meccanica dei pesi in caduta Joule riuscì a fare una buona stima dell'equivalenza tra calore e lavoro meccanico ( $1 \text{ cal} = 4,18 \text{ J}$ ).

Nel calorimetro di Callendar, come nell'esperimento di Joule, l'energia meccanica viene trasformata in energia termica, attraverso il lavoro fatto dalle forze di attrito, ma in questo caso l'attrito si sviluppa sulla parete esterna di un calorimetro di rame, avvolto da una cinghia che sostiene un peso  $F$ . Agendo su una manovella, si fa ruotare il calorimetro in verso tale che l'attrito tenda a sollevare il peso attaccato alla cinghia, cosa che, in alcuni modelli di questa apparecchiatura, viene evidenziata dal fatto che una molla elicoidale attaccata alla cinghia dalla parte opposta del peso si rilascia completamente. Per conoscere il lavoro fatto dalla forza d'attrito della cinghia sul calorimetro è necessario conoscere il diametro di quest'ultimo e il numero di giri fatti con la manovella. Un termometro al decimo o al quinto di grado, con il bulbo inserito nel calorimetro, ne registra la variazione di temperatura. Infine, il rapporto tra il lavoro fatto girando la manovella, espresso in joule, e il calore ottenuto dall'attrito radente della cinghia che struscia sul calorimetro, espresso in calorie, fornisce l'equivalente meccanico della caloria.

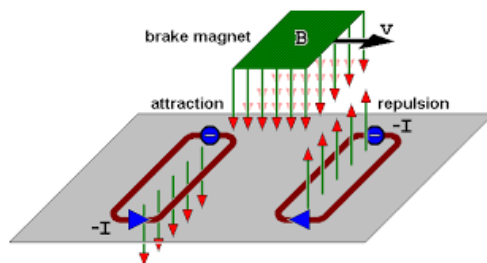
Di seguito vengono riportati a titolo esemplificativo le condizioni operative ed i risultati conseguiti in un esperimento effettivamente realizzato con un termometro a mercurio al quinto di grado:

- massa del calorimetro di rame  $m = 733 \text{ g}$
- diametro del calorimetro  $\varnothing = 48 \text{ mm}$
- calore specifico del rame  $c_s = 385 \text{ J} / (\text{K}\cdot\text{kg})$
- peso applicato  $F = 49 \text{ N}$
- numero di giri di manovella  $N = 200$
- temperatura iniziale del calorimetro  $T_i: 22.4 \text{ }^\circ\text{C}$
- temperatura finale  $T_f = 27.0 \text{ }^\circ\text{C}$
- Lavoro meccanico  $L = F \cdot \Delta S = F \cdot \pi \cdot \varnothing \cdot N \approx 1.5 \cdot 10^3 \text{ J}$
- Calore sviluppato nel calorimetro  $Q = m \cdot c_s \cdot (T_f - T_i) = 1.3 \cdot 10^3 \text{ J}$

La differenza tra l'energia termica raccolta nel calorimetro e il lavoro della forza d'attrito è giustificata dai limiti dell'apparato sperimentale (perdite di calore nell'aria circostante) e, in misura minore, dal non aver considerato la capacità termica del termometro, dei tappi del calorimetro e della cinghia. Si noti inoltre che per la buona riuscita dell'esperimento è indispensabile che l'apparato sperimentale venga utilizzato una sola volta in una seduta di laboratorio e che venga montato nel punto in cui verrà utilizzato almeno un'ora prima del suo impiego, per dar tempo alla temperatura di uniformarsi con quella della stanza. Infine, richiamiamo l'attenzione sul fatto che la temperatura massima all'interno del calorimetro si raggiunge anche un paio di minuti dopo che si è smesso di girare la manovella.

## Correnti di Foucault

È noto che un magnete esercita la sua forza d'attrazione in modo evidente unicamente su altri magneti o su materiali ferromagnetici. Nonostante ciò, sono largamente utilizzati per ridurre la velocità di macchinari, come ad esempio il giogo di una bilancia, o veicoli, addirittura come i treni, i cosiddetti freni magnetici, il cui principio di funzionamento è basato sull'interazione tra un magnete e le correnti parassite che si sviluppano su una parete metallica in moto relativo rispetto al magnete.



Le correnti parassite, dette anche correnti di Foucault, sono indotte nel metallo dalla variazione del campo magnetico locale prodotta dal movimento del magnete rispetto alla lastra metallica, e il loro verso è tale da produrre a loro volta un campo magnetico che si oppone alla variazione del campo magnetico applicato (Legge di Lenz), rallentando il moto.

Un esperimento classico da laboratorio è il cosiddetto Pendolo di Waltenhofen: si fa oscillare una lastrina metallica (ad esempio di alluminio) tra le espansioni polari di un elettromagnete; accendendo l'alimentazione di questo, si osserva che le oscillazioni vengono bruscamente smorzate. Si ripete poi la prova con una lastrina che presenta dei tagli trasversali, e si osserva che l'effetto del campo magnetico in questo secondo caso è molto minore, perché i tagli limitano i percorsi delle correnti parassite.



Un modo alternativo per evidenziare questo stato di cose è quello di attaccare con del nastro adesivo un magnete permanente al neodimio (o una coppia di magneti, uno per parte) sulla parte esterna di un carrello della guida a cuscinio d'aria, in modo che il campo magnetico prodotto sia diretto verso il profilato della guida, e confrontare il moto di questo carrello sulla guida inclinata con quello di un carrello senza magneti. In alternativa, basta provare a far scivolare uno di questi magneti su uno scivolo metallico improvvisato: l'effetto di frenatura sarà tanto più evidente quanto più il magnete è "potente".

