

PROGETTO LAUREE SCIENTIFICHE

A. S. 2006/2007

Laboratorio di Fisica: meccanica e termodinamica

A cura di

Aurelio Agliolo Gallitto ed Emilio Fiordilino

Dipartimento di Scienze Fisiche ed Astronomiche, Università di Palermo



Progetto
Lauree Scientifiche
FISICA

Indice

1	Acquisizione e analisi dei dati sperimentali	3
1.1	Valutazione degli errori nelle misurazioni	3
1.2	Rappresentazione grafica di una funzione	6
1.3	Rappresentazione grafica di dati sperimentali	7
1.4	Retta di massima e minima pendenza	8
2	Esperienze di laboratorio: meccanica	11
2.1	Misura del coefficiente di attrito statico	11
2.1.1	Descrizione dell'esperienza	12
2.1.2	Aspetti preliminari	14
2.1.3	Esercitazioni preliminari	14
2.2	Misura del coefficiente di attrito dinamico	16
2.2.1	Descrizione dell'esperienza	16
2.2.2	Aspetti preliminari	17
2.2.3	Esercitazioni preliminari	17
3	Esperienze di laboratorio: termodinamica	21
3.1	Calore specifico	21
3.1.1	Aspetti preliminari: peso specifico e densità	22
3.1.2	Misurazione del calore specifico	23
3.2	Dilatazione termica dei solidi	26

3.2.1	Introduzione	26
3.2.2	Approfondimenti	27
3.2.3	Descrizione dell'esperienza	27
3.2.4	Approfondimenti	28
3.3	Legge di stato dei gas perfetti	29
3.3.1	Digressione	32
3.4	Misura del calore latente di fusione dell'indio	33
4	Realizzazione di esperienze con l'uso di sensori <i>online</i>	37
4.1	Misura del coefficiente di attrito statico e dinamico	37
4.1.1	Descrizione dell'esperienza	37
4.2	Studio della legge di Boyle	40
5	Valutazione dell'attività svolta dagli studenti	43
5.1	Esempio di scheda di relazione degli Allievi	44
5.2	Esempio di griglia di valutazione dell'attività di laboratorio	45

Obiettivi

L'attività di laboratorio nel percorso didattico deve mirare ai seguenti obiettivi.

1. Rafforzare i concetti che lo Studente incontra durante le lezioni teoriche in classe e stimolarlo a progettare e portare a termine semplici esperienze in cui la teoria mostri tutto il suo meccanismo.
2. Stimolare la curiosità e la creatività dello Studente in modo che sia in grado di proporre nuove esperienze che confermino quanto noto e lo spingano, se possibile, a ricavare qualcosa di ancora ignoto.
3. Avviare lo Studente verso l'osservazione quantitativa dell'esperimento attraverso la pratica della misurazione.
4. Spingere lo Studente al controllo di quanto ottenuto attraverso l'esame critico dell'esperienza condotta a termine.

Nella preparazione dell'esperienze di laboratorio deve essere chiaro il percorso formativo che faccia comprendere allo Studente il proprio punto di partenza conoscitivo, i progressi ottenuti nella preparazione dell'esperimento, il risultato ottenuto, le novità concettuali e metodologiche con cui ci si confronta. Inoltre, è opportuno far tesoro dell'esperienza degli Insegnanti per la messa a punto di possibili percorsi formativi (didattici e di laboratorio) che si possono attuare nelle varie classi e varie realtà scolastiche, prendendo in considerazione la possibilità di realizzare i seguenti esperimenti.

Esperimenti operativi, per misurare una grandezza o studiare/scoprire una legge fisica; cioè esperimenti che possono essere eseguiti in laboratorio allo scopo di studiare la relazione tra le varie grandezze fisiche coinvolte e quindi la relativa legge fisica. Questo tipo di esperimenti hanno valenze didattiche prevalenti per la realizzazione delle misurazioni, l'analisi dei dati, la formalizzazione della legge fisica e per gli aspetti addestrativi in generale.

Esperimenti illustrativi, per visualizzare un determinato fenomeno fisico; cioè esperimenti usati dall'Insegnante durante la lezione o in laboratorio per attirare l'attenzione degli Studenti e stimolare la riflessione su una particolare fenomenologia, prima di iniziare la discussione dettagliata sull'argomento. Questo tipo di esperimenti ha la caratteristica di stimolare l'interesse e la curiosità e quindi di trascinare a trovare spiegazioni, chiarendo così, generalmente a livello solo qualitativo, i concetti fisici coinvolti. Una notevole quantità di esperimenti di questo genere sono descritti e illustrati in Ref. [1].

È importante eseguire esperimenti relativi a fenomeni che coinvolgono la vita di tutti i giorni, usando oggetti e attrezzi familiari. Dalla conoscenza e dalla memoria di cose familiari, che si è abituati a descrivere con il linguaggio quotidiano, lo Studente può sviluppare meglio il “pensiero critico” e passare più facilmente dal linguaggio quotidiano a quello scientifico. Infine, è raccomandabile l'introduzione degli Studenti all'utilizzazione del computer nella realizzazione delle esperienze di laboratorio. L'uso del computer è importante sia per l'analisi dei dati, sia per la raccolta *online* di dati degli esperimenti; mediante opportuni sensori è possibile, infatti, acquisire dati che variano molto rapidamente o molto lentamente nel tempo. In questo modo, l'uso del computer permette di ampliare notevolmente le proprie capacità sperimentali e di percepire aspetti che difficilmente sarebbero osservabili con le tecniche manuali.

Capitolo 1

Acquisizione e analisi dei dati sperimentali

L'attività di laboratorio deve addestrare lo studente a maneggiare i dati sperimentali acquisiti nelle esercitazioni. Prima di iniziare l'attività di laboratorio è opportuno introdurre i concetti fondamentali sui metodi di misura delle grandezze fisiche nell'attività di laboratorio. In particolare, lo studente deve acquisire il concetto che una grandezza fisica non può essere misurata con una precisione infinita, ma con un'indeterminazione. Pertanto, egli deve prendere “confidenza” con l'indeterminazione delle misure e tenerle opportunamente in considerazione. A questo scopo sarebbe necessario acquisire gli elementi indispensabili della teoria degli errori e dell'analisi dei dati. Si veda, per esempio, *Taylor, Introduzione all'analisi degli errori*, oppure *Cannelli, Metodologie sperimentali in Fisica*.

1.1 Valutazione degli errori nelle misurazioni

Supponiamo di volere misurare, mediante un idoneo strumento, una grandezza fisica. Si esegua la misura una sola volta e sia x il valore determinato in un dato sistema di unità di misura, valore risultante dal confronto diretto con il campione di misura o diretta-

mente letto sulla scala dello strumento. Ci si chiede: x coincide con il valore effettivo X della grandezza, cioè può senz'altro essere assunto a definire quantitativamente la grandezza in esame? A tale domanda non si può che rispondere negativamente; infatti, per il concorrere di numerosi fattori, di diversa natura, la misura ottenuta è certamente affetta da un errore, piccolo o grande che sia, così che il valore x misurato si differenzia sicuramente dal valore effettivo X della grandezza in esame.

Tra i fattori che possono modificare il risultato di una misura si possono ragionevolmente elencare i seguenti:

- a) posizione dell'occhio dell'osservatore rispetto alla scala dello strumento, dalla quale può derivare il cosiddetto *errore di parallasse*;
- b) spessore dell'indice e dei tratti della graduazione dello strumento, dalla quale deriva una maggiore o minore incertezza da parte dell'operatore circa il valore da assumere come risultato della lettura;
- c) grado di efficienza dello strumento usato, da cui deriva un'esecuzione più o meno buona della misurazione;
- d) grado di preparazione e di esperienza dell'operatore, dal quale dipende un uso più o meno corretto dello strumento e, più in generale, un'esecuzione più o meno buona delle operazioni da compiere;
- e) taratura dello strumento, operazione alla quale viene sottoposto ogni strumento a lettura diretta e che consiste nel regolare lo strumento in modo che le indicazioni da esso date corrispondano, con approssimazione più o meno buona, ai valori della grandezza misurata.

I fattori elencati non si riferiscono certamente a tutte le possibili cause d'errore delle quali molte sono difficilmente individuabili, sfuggendo in pratica a ogni nostro controllo; tuttavia, il quadro che essi forniscono, pur se largamente incompleto, è già piuttosto

significativo. Benché a prima vista i fattori citati sembrino tutti diversissimi fra loro, un esame più approfondito ci permette di stabilire che gli errori di misura, quali che essi siano, possono considerarsi di due sole specie.

Errori sistematici. Questo tipo di errori sono da attribuire ad un errato metodo di misura o di calcolo, o all'uso di strumenti mal tarati o non ben rettificati; essi si ripetono “sistematicamente” nello stesso senso ogni volta che si adotta quel metodo o si fa uso di quello strumento.

Errori casuali. Questo tipo di errori sono, invece, errori dipendenti dalla sovrapposizione di cause diversissime e variabili che, agendo in maniera del tutto casuale, ora in un senso ora nell'altro, influiscono in modo imprevedibile, e in misura più o meno grande, sui risultati delle misure eseguite.

Per trattare in modo quantitativo l'influenza degli errori nelle misure delle grandezze fisiche, definiamo l'errore assoluto e l'errore relativo, associati alla misura della grandezza.

Errore assoluto. Dalle considerazioni fatte segue che il valore x della grandezza misurata non corrisponde con il valore vero X . Lo scarto tra il valore misurato e il valore vero è detto errore assoluto δx ed è dato da

$$\delta x = |x - X|. \quad (1.1)$$

Errore relativo. Per valutare l'entità di un errore può essere utile confrontarlo con una grandezza a esso omogenea, ed è naturale scegliere per questo proprio la misura a cui esso si riferisce. In questo caso è significativo, quindi, considerare il rapporto

$$\epsilon x = \frac{\delta x}{|x|}, \quad (1.2)$$

$$\epsilon x \% = \frac{\delta x}{|x|} \times 100. \quad (1.3)$$

Il rapporto di Equazione (1.2) è detto errore relativo; la relazione (1.3) definisce invece l'errore relativo percentuale.

1.2 Rappresentazione grafica di una funzione

Per studiare l'andamento di una grandezza in funzione di un'altra è molto utile servirsi di un grafico. È noto dalla geometria che ogni punto di un piano può essere messo in corrispondenza biunivoca con una coppia di numeri reali. Questa corrispondenza può essere fatta in infiniti modi. Generalmente si fissa sul piano un sistema di riferimento cartesiano costituito da due assi ortogonali, l'asse delle ascisse e delle ordinate, su ognuno dei quali viene fissato un riferimento individuato dalla posizione dello zero, dalla lunghezza dei segmenti unitari u_x e u_y , rispettivamente, e dal verso positivo. A ogni coppia di numeri reali (x, y) è associato, nel piano, il punto $\mathbf{P}$ che ha come ascissa il valore x e come ordinata il valore y . Se x e y sono legati dalla dipendenza funzionale $y = f(x)$, l'insieme dei punti del piano che soddisfano tale relazione costituisce un grafico della funzione $f(x)$.

La scelta del fattore di scala per le unità di misura delle ascisse e delle ordinate u_x e u_y , rispettivamente, deve essere fatta in modo da ottenere una rappresentazione grafica chiara e di facile interpretazione. La scelta di u_x e u_y , in connessione con i due intervalli entro i quali la funzione assume valori significativi, determina anche la precisione con cui un grafico può essere utilizzato. *Affinché un grafico sia utile occorre che esso sia chiaro e leggibile.*

Esempio 1.1. Rappresentare graficamente la funzione $y = 20 + 2x$ nell'intervallo di valori $0 < x < 10$. Il grafico della funzione è mostrato nelle Figure 1.1 e 1.2. Il grafico di Figura 1.1 non è corretto in quanto la scelta del fattore di scala per gli assi non permette una chiara lettura della funzione. Una migliore rappresentazione della funzione è mostrata in Figura 1.2.

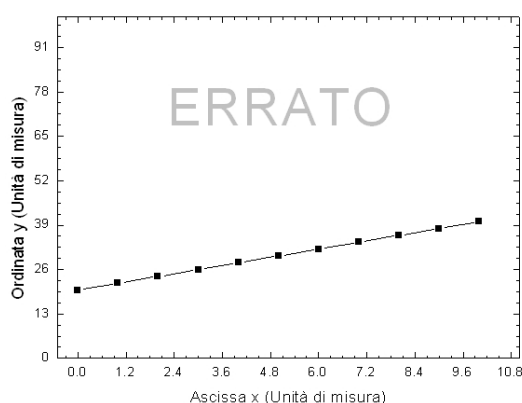


Figura 1.1: Rappresentazione grafica della funzione $y = 20 + 2x$ in modo errato nell'intervallo $0 < x < 10$.

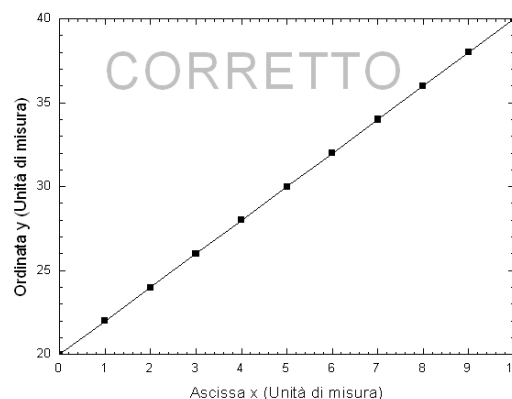


Figura 1.2: Rappresentazione grafica della funzione $y = 20 + 2x$ in modo corretto nell'intervallo $0 < x < 10$.

1.3 Rappresentazione grafica di dati sperimentali

I valori ottenuti nel corso della misurazione di due grandezze fisiche possono essere riportati in un grafico al fine di studiare la dipendenza di una grandezza in funzione dell'altra. Esistono tuttavia delle differenze sostanziali tra i grafici di funzioni analitiche e quelli di misure di grandezze fisiche. Nel primo caso si possono calcolare un numero grande quanto si vuole di coppie di valori (x, y) , cosicché la curva che rappresenta la funzione può essere determinata con grande accuratezza. Per la dipendenza sperimentale tra le due grandezze fisiche si ha a disposizione, invece, un numero limitato di coppie di valori. Inoltre, i valori sperimentali delle grandezze misurate sono affette da un errore legato alla modalità con cui è stata eseguita la misurazione. Per indicare simbolicamente sul grafico l'entità di tale errore si associa a esso un segmento di lunghezza corrispondente, come mostrato in Figura 1.3 dell'esempio seguente.

La presenza degli errori, con il loro significato di indeterminazione sul valore della misura, fa sì che la curva che rappresenta sul grafico la funzione $y = f(x)$ non debba necessariamente passare per i punti, ma per i rettangoli individuati, rispettivamente, da $2\delta x$ e $2\delta y$.

Esempio 1.2. Supponiamo di misurare più volte la temperatura di un corpo al variare del tempo. I valori di temperatura misurati e i rispettivi errori sono riportati in Tabella 1.1. I risultati delle misurazioni sono illustrati graficamente in modo corretto in Figura 1.3.

$t \pm \delta t$ (s)	$T \pm \delta T$ (°C)
2.0 ± 0.5	10 ± 1
4.0 ± 0.5	12 ± 1
6.6 ± 0.5	15 ± 1
9.0 ± 0.5	17 ± 1
11.0 ± 0.5	19.9 ± 0.5
13.0 ± 0.5	22.3 ± 0.5
14.8 ± 0.5	24.4 ± 0.5

Tabella 1.1: Valori di temperatura rilevati al trascorrere del tempo.

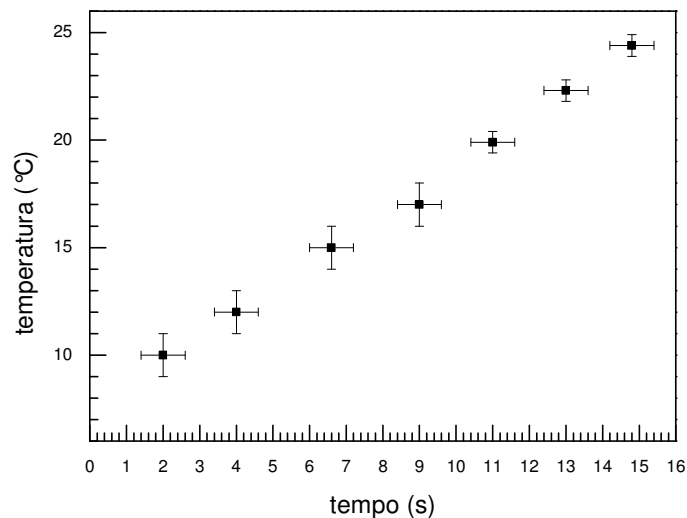


Figura 1.3: Rappresentazione grafica dei dati sperimentali riportati in Tabella 1.1

1.4 Retta di massima e minima pendenza

Nel caso in cui si conosca a priori la funzione che lega le due grandezze in esame, i dati sperimentali servono a determinare i valori numerici dei parametri che caratterizzano tale funzione. Un metodo semplice che si può usare a tale scopo è il metodo grafico, che consiste nell'individuare la retta che passa per i rettangoli individuati dagli errori massimi.¹

Per facilitare l'operazione di individuare la retta che passa per i punti sperimentali, si

¹Ricordiamo brevemente che una retta è descritta dall'equazione $y = mx + q$, dove m è il coefficiente angolare della retta e q è l'intersezione con l'asse delle ordinate. Il coefficiente angolare può essere

deve cercare di porre in grafico i dati con le scale adatte in modo tale che il grafico assuma un andamento rettilineo, cioè, i dati siano descritti da una retta. Si tracciano poi le due rette che, intersecando tutti i segmenti che rappresentano gli errori, abbiano rispettivamente la minima e la massima pendenza:

$$y = m_{\min}x + q_{\max}; \quad (1.4)$$

$$y = m_{\max}x + q_{\min}. \quad (1.5)$$

La retta che meglio si adatta ai dati sperimentali è data da $y = mx + q$, con

$$m = \frac{m_{\max} + m_{\min}}{2} \pm \frac{m_{\max} - m_{\min}}{2}; \quad (1.6)$$

$$q = \frac{q_{\max} + q_{\min}}{2} \pm \frac{q_{\max} - q_{\min}}{2}. \quad (1.7)$$

A esempio, se i dati della Tabella 1.1 si riferiscono a un andamento rettilineo in un grafico lineare, cioè siano descritti dalla funzione $T = at + T(0)$, dal grafico dei dati, mostrato in Figura 1.4, si ricavano i valori dei parametri:

$$a = (1.15 \pm 0.15) \text{ }^{\circ}\text{C/s} \quad \text{e} \quad T(0) = (7.7 \pm 1.3) \text{ }^{\circ}\text{C}.$$

Bisogna notare che se non è possibile tracciare neanche una retta che intersechi tutti i segmenti che rappresentano gli errori, significa che si è verificato uno dei seguenti casi:

- l'ipotesi che la funzione fosse lineare è sbagliata;
- qualcuno dei punti sperimentali è affetto da un errore sistematico.

Lo studente, seguendo il buon senso, dovrebbe riconoscere la causa e intervenire opportunamente per superare questa difficoltà.

determinato dal rapporto

$$m = \frac{\Delta y}{\Delta x} = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1}.$$

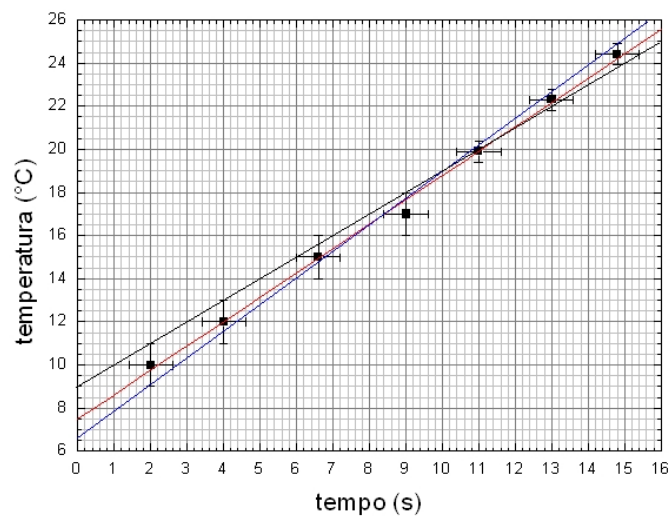


Figura 1.4: Determinazione grafica della retta che meglio si adatta ai dati sperimentali (linea rossa); retta di minima pendenza (linea nera); retta di massima pendenza (linea blu).

Capitolo 2

Esperienze di laboratorio: meccanica

Le esperienze proposte possono essere realizzate utilizzando strumenti di misura e attrezzi disponibili in laboratorio; esse riguardano concetti e leggi fisiche chiaramente individuabili e richiedono l'esecuzione di misurazioni quantitative e calcoli per la corrispondente analisi dei dati sperimentali raccolti. In particolare, per il modulo di meccanica si propone di realizzare una serie di esperienze operative riguardanti concetti (leggi e/o grandezze) fondamentali, partendo dallo studio delle grandezze vettoriali, fino al principio di conservazione dell'energia meccanica. Durante le lezioni in classe, invece, si possono eseguire vari esperimenti illustrativi allo scopo di attrarre e stimolare l'attenzione degli studenti durante la lezione.

Si propone la realizzazione di esperienze principali e varie esperienze preliminari, che possono essere realizzate al fine di comprendere meglio i concetti che stanno alla base delle esperienze proposte.

2.1 Misura del coefficiente di attrito statico

Obiettivi: comprensione della natura delle forze di attrito

Concetti: composizione e scomposizione di forze, attrito e forze di attrito, equilibrio tra forze

Materiali: piano inclinato regolabile, blocchi di legno, riga graduata, goniometro, dinamometro

2.1.1 Descrizione dell'esperienza

Attività, misure e calcoli:

Si dispone il piano inclinato orizzontalmente con il blocco poggiato su di esso, come mostrato in Figura 2.1.

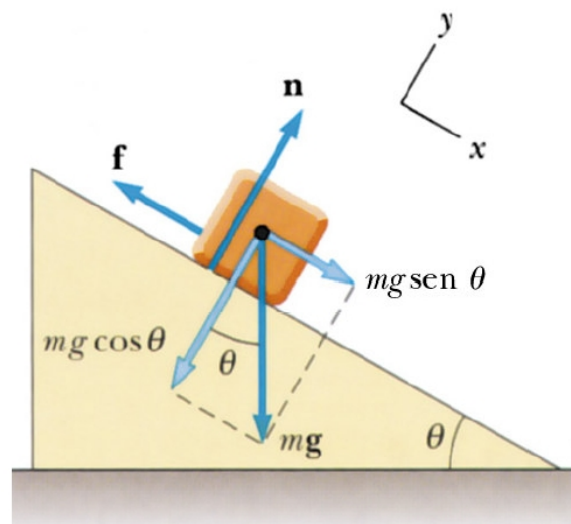


Figura 2.1: Piano inclinato.

Si aumenta, quindi, l'angolo θ del piano inclinato fino a quando il blocco non inizia a scivolare; misurando questo angolo critico θ_c si determina il coefficiente di attrito per mezzo delle seguenti relazioni, che si ricavano dalla Figura 2.2

$$f = \mu mg \cos \theta_c \quad (2.1)$$

$$\mu mg \cos \theta_c = mg \sin(\theta) \quad (2.2)$$

$$\mu = \frac{mg \sin \theta_c}{mg \cos \theta_c} = \tan \theta_c. \quad (2.3)$$

$$\mu mg \cos \theta_c = mg \sin(\theta) \quad (2.4)$$

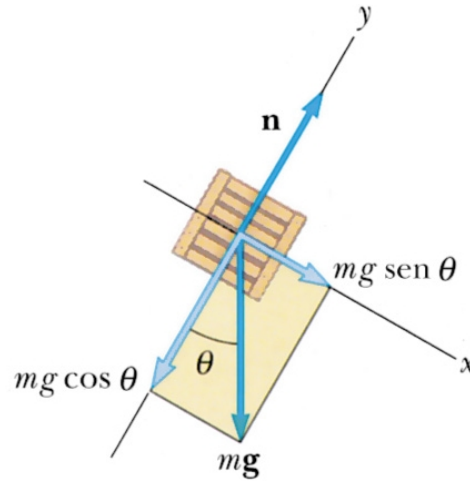


Figura 2.2: Scomposizione delle forze sul piano inclinato.

h (cm)	$b = \sqrt{\ell^2 - h^2}$	$\mu = \tan \theta_c = h/b$
14.8	38.2	0.387
16.0	37.7	0.424
15.4	38.0	0.405
14.0	38.5	0.363

Tabella 2.1: Valori misurati dell'altezza del piano inclinato h ; valori calcolati della base del piano inclinato b ; valori del coefficiente di attrito.

$$\mu = \frac{mg \sin \theta_c}{mg \cos \theta_c} = \tan \theta_c. \quad (2.5)$$

Quindi, misurando l'angolo critico θ_c , formato dal piano inclinato rispetto al piano orizzontale, per il quale il blocco comincia a scivolare, si può determinare il coefficiente di attrito statico delle due superfici a contatto.

Risultati dell'esperienza

Abbiamo eseguito questa esperienza con un piano di plexiglas di lunghezza $\ell = 41$ cm e un blocco di legno levigato. I risultati delle misurazioni sono riportati nella Tabella 2.1.

Per determinare il valore migliore del coefficiente di attrito e la sua indeterminazione

calcoliamo, rispettivamente, il valore medio

$$\bar{\mu} = \sum_{i=1}^4 \frac{\mu_i}{N} = 0.395 \quad (2.6)$$

e la semidispersione

$$\delta\mu = \frac{\mu_{max} - \mu_{min}}{2} = \frac{0.424 - 0.363}{2} = 0.03 \quad (2.7)$$

Dopo aver determinato l'indeterminazione $\delta\mu$ del valore del coefficiente d'attrito, approssimiamo correttamente il valore di μ , che risulta quindi

$$\mu = \bar{\mu} \pm \delta\mu = 0.40 \pm 0.03 \quad (2.8)$$

È da notare che in queste misurazioni, gli errori strumentali sono trascurabili rispetto agli errori casuali.

Alcune considerazioni sono a questo punto d'obbligo. La relazione (2.1) dà il valore massimo della forza d'attrito: per angoli $\theta < \theta_c$ la forza d'attrito è proprio uguale a $mg \sin \theta$: il corpo comincia a scivolare quando la forza d'attrito massima è minore della componente della forza peso lungo il piano inclinato $f_{\parallel} = mg \sin \theta$ che definisce proprio l'angolo critico θ_c . Per angoli maggiori di quello critico il blocco scivola lungo il piano inclinato ma la forza d'attrito rimane costante.

2.1.2 Aspetti preliminari

- Calcolo vettoriale
- Cinematica
- Leggi della dinamica
- Forza di gravità
- Forze d'attrito

2.1.3 Esercitazioni preliminari

1. Composizione e scomposizione di vettori

Obiettivi: differenza tra grandezze scalari e vettoriali

Concetti: calcolo vettoriale, equilibrio delle forze, III principio di Newton

Materiali: dinamometri, righello e carta millimetrata

Si possono realizzare varie esperienze che riguardano la composizione e scomposizione di vettori. Qui di seguito, ne suggeriamo alcune.

- Percorrere due tratti della stanza contando il numero di passi e calcolare i vettori spostamento; calcolare la loro somma;
- Mediante tre dinamometri e un foglio di carta millimetrata comporre o scomporre un vettore dato, rispetto a un sistema di assi cartesiani.
- Mediante l'apparato sperimentale mostrato in Figura 2.3 dimostrare che le forze sono delle grandezze vettoriali.

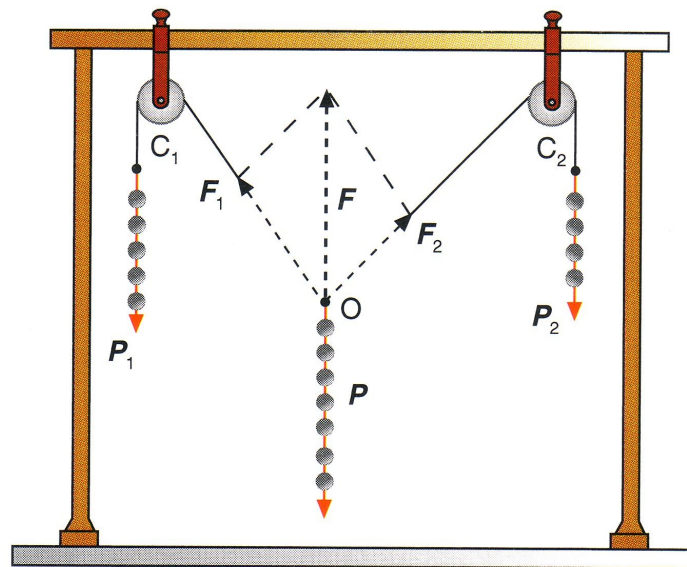


Figura 2.3: Apparato sperimentale per lo studio della natura vettoriale delle forze.

2. Piano inclinato

Obiettivi: ...

Concetti: ...

Materiali: ...

Descrizione dell'esperienza – Disporre un piano inclinato in modo da formare un angolo θ fissato rispetto al piano orizzontale. Collegare un carrellino a un dinamometro, per mezzo di una fune inestensibile e di massa trascurabile rispetto alla massa del carrellino. Misurare la forza sul dinamometro. Calcolare la risultante delle forze che agiscono sul carrellino. Ripetere le misurazioni cambiando l'angolo θ del piano inclinato.

Le varie forze che agiscono sul carrellino posto sul piano inclinato sono mostrate in Figura 2.1 e 2.2.

La buona riuscita della misurazione dipende da quanto sia trascurabile la forza di attrito tra carrellino e piano inclinato.

Nota: *Le classi che ancora non hanno affrontato argomenti di trigonometria possono determinare le componenti delle forze con il metodo dei triangoli simili.*

2.2 Misura del coefficiente di attrito dinamico

Obiettivi: comprensione della natura delle forze di attrito

Concetti: attrito e forze di attrito, lavoro di una forza, lavoro ed energia potenziale elastica, energia cinetica, trasformazioni di energia

Materiali: piano scabro¹, blocchi di legno, riga graduata, molla elicoidale tarata;

2.2.1 Descrizione dell'esperienza

Si lancia un oggetto di massa nota m sul piano orizzontale e si misura la posizione in cui si arresta, cioè la distanza ℓ fra il punto in cui la molla è a riposo e il punto in cui si ferma

¹Naturalmente se il piano del tavolo di casa dove si svolgerà l'esperimento è troppo liscio, l'allievo dovrà avere l'accortezza di trattare con carta vetrata a grana grossa la superficie al fine di aumentarne la rugosità; naturalmente dovrà anche essersi assicurato prima dell'ospitalità dei nonni per un numero di giorni adeguato a far scemare la furia omicida del padre!

il corpo; il corpo può essere lanciato per mezzo di una molla compressa di una quantità x , come mostrato in Figura 2.4.



Figura 2.4: Lancio del blocco mediante la molla compressa.

Dal principio di conservazione dell'energia meccanica avremo

$$\Delta U + \Delta K = L_a \quad \Rightarrow \quad \frac{1}{2}kx^2 = \mu_d mg\ell \quad (2.9)$$

da cui ricaviamo

$$\mu_d = \frac{kx^2}{2mg\ell} . \quad (2.10)$$

2.2.2 Aspetti preliminari

- Lavoro
- Energia cinetica
- Energia potenziale elastica

2.2.3 Esercitazioni preliminari

1. Taratura di una molla elicoidale

obiettivi: acquisizione di un metodo scientifico per la taratura di uno strumento di misura;

Concetti: forze elastiche, legge di Hooke, misurazione statica della costante elastica;

Materiali: molla, carta millimetrata, pesi, riga graduata, bilancia.

Descrizione dell'esperienza – Misurare l'allungamento o la compressione della molla dovuti all'applicazione di una forza che viene misurata con un dinamometro. Riportare in grafico le

forze in funzione dell'allungamento. La pendenza della retta ottenuta dà la costante elastica della molla.

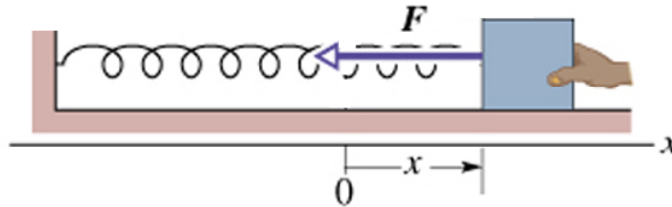


Figura 2.5: Metodo sperimentale per la taratura di una molla elicoidale.

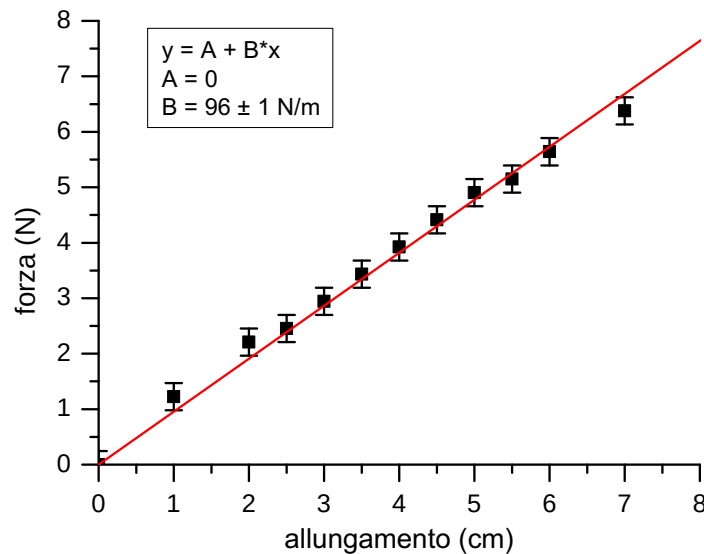


Figura 2.6: Andamento della forza applicata in funzione dell'allungamento della molla.

Cenni teorici: legge di Hooke – Una molla sollecitata da una forza F di trazione o compressione si deforma. Se la molla non viene deformata oltre il limite di elasticità, cioè se la molla non viene allungata o compressa troppo, la deformazione x è proporzionale alla forza applicata: $x \propto F$. Per il III principio della dinamica, la molla eserciterà una forza di pari intensità in verso opposto alla forza esterna. Questo può essere descritto dalla seguente legge

$$F_e = -kx \quad (2.11)$$

dove F_e è la forza elastica esercitata dalla molla, x è l'allungamento della molla causato dall'azione della forza esterna.

La costante di proporzionalità k è detta costante elastica della molla, e si misura in N/m (Newton a metro).

Questa esperienza permette di riprodurre e analizzare criticamente la procedura con cui si passa dall'osservazione di un fenomeno (la deformazione di una molla soggetta a una forza) e dalla misurazione delle grandezze fisiche rilevanti (la forza e la deformazione) all'enunciazione di una legge fisica: $F_e = -kx$. Una maniera comoda di condurre la taratura è quella di sospendere la molla a un gancio fisso in modo che possa allungarsi liberamente e appendere alla molla pesi diversi per allungarla. L'allungamento della molla può essere così facilmente misurato. L'allievo dovrà aver cura di attendere che le oscillazioni che seguono la sospensione del peso siano cessate prima di misurare l'allungamento. L'allievo dovrà inoltre trasformare il peso dei corpi appesi da chilogrammi a Newton: $1\text{kg} = 9.81\text{ N}$. In assenza di corpi appesi, la molla si allungherà di un po' per effetto del proprio stesso peso: è questo una fonte di errore sistematico?

Capitolo 3

Esperienze di laboratorio: termodinamica

Le esperienze proposte possono essere realizzate utilizzando strumenti di misura e attrezzi disponibili in laboratorio; esse riguardano concetti e legge fisiche chiaramente individuabili e richiedono l'esecuzione di misurazioni quantitative e calcoli per la corrispondente analisi dei dati sperimentali raccolti. In particolare, per il modulo di termodinamica si propone di realizzare una serie di esperienze riguardanti concetti (leggi e/o grandezze) fondamentali, quali il calore e la temperatura. Durante le lezioni in classe, invece, si possono eseguire vari esperimenti illustrativi allo scopo di attrarre e stimolare l'attenzione degli studenti durante la lezione.

Si propone la realizzazione di esperienze principali e varie esperienze preliminari, che possono essere realizzate al fine di comprendere meglio i concetti che stanno alla base delle esperienze proposte.

3.1 Calore specifico

Obiettivi: Lo scopo dell'esperienza è la determinazione del calore specifico di alcune sostanze. Alla fine del lavoro lo studente dovrebbe avere chiara la differenza tra calore e temperatura. La diversità è rilevabile dal fatto che i due concetti vengono usati nei

calcoli in modo diverso e pertanto sono concetti diversi: *un concetto fisico è definito dall'uso che se ne fa e non da cosa se ne dice*. L'esperienza deve permettere agli Allievi di imparare a portare a termine misurazioni tecnicamente difficili, come quelle che richiedono l'uso di oggetti a temperatura diversa.

Concetti: ...

Materiali: cilindretti di sostanze diverse quali acciaio, bronzo, alluminio, criptonite; una bilancia di precisione; un calibro; una piastra elettrica per riscaldare liquidi; recipienti calibrati per la misura del volume di acqua.

3.1.1 Aspetti preliminari: peso specifico e densità

È opportuno, per prima cosa, determinare il peso specifico dei vari cilindretti. La ragione consiste nel fatto che è conveniente controllare in tabelle il calore specifico misurato per i diversi cilindretti. Il peso specifico generalmente individua abbastanza bene il materiale del cilindretto (come Archimede intuì un paio di millenni fa) anche se si possono trovare tante argomentazioni ed esempi contro. Inoltre lo Studente dovrebbe abituarsi a farsi un'idea della sostanza di un cilindretto dall'aspetto. Così l'alluminio è bianco; l'acciaio è lucente; il rame è rosso o, se ossidato, verde; il bronzo ha il colore delle statue (quelle di bronzo e non quelle di marmo), la criptonite può essere rossa, verde e d'oro. La definizione di peso specifico p è:

$$p = \frac{P}{V}, \quad (3.1)$$

dove P è il peso del corpo e V il suo volume.

Se il peso P viene misurato in kg_p (la p a pedice sta per peso) e il volume V in m^3 l'unità di misura del peso specifico è kg_p/m^3 ; per esempio, il peso specifico dell'acqua è di $1000 \text{ kg}_p/\text{m}^3$. Tuttavia, per evitare l'uso di numeri grossi e perché nella vita quotidiana si fa così, il peso specifico delle varie sostanze viene dato in g/cm^3 ; in questo modo il peso specifico dell'acqua è $1 \text{ g}_p/\text{cm}^3$. Pertanto, per ottenere il peso specifico nel sistema SI (kg_p/m^3) basta moltiplicare il valore del peso specifico in cgs (g_p/cm^3) per il fattore 1000.

È opportuno, a questo punto che l'Allievo tenga presente che il concetto di peso specifico

Sostanza	ρ (g/cm ³)	q (J kg ⁻¹ K ⁻¹)	Composizione
alluminio	2.70	0.88	
rame	8.96	0.39	
acciaio	7.8	0.48	99%Fe 0.8%C
acciaio inox	7.8	0.46	85%Fe 13%Cr 0.2%C
bronzo	8.9	0.38	90%Cu 10%Sn

Tabella 3.1: Densità e calore specifico di alcune sostanze solide.

è vagamente ambiguo rispetto al concetto di densità. La densità ρ si definisce come

$$\rho = \frac{M}{V}, \quad (3.2)$$

dove M è la massa del corpo e V è il suo volume.

L'unità di misura della massa è il kg; il kg_p come unità di misura della forza è definito proprio in modo che la massa di 1 kg abbia il peso di 1 kg_p . In pratica numericamente, ma non concettualmente, peso specifico e densità sono eguali.

Il peso viene misurato tramite una bilancia elettronica ormai rintracciabile facilmente in commercio. Il volume di un cilindro è dato da $V = \pi r^2 h$, dove r è il raggio del cilindretto e h è la sua altezza.

3.1.2 Misurazione del calore specifico

Obiettivi: ...

Concetti: ...

Materiali: ...

Il calore specifico di una sostanza per definizione è dato dalla quantità di energia (calore) che occorre fornire alla massa unitaria (kg) di quella sostanza per innalzarne la temperatura di 1 grado:

$$q = \frac{Q_{\leftarrow}}{M \Delta T}, \quad (3.3)$$

dove q è il calore specifico, M la massa del corpo e ΔT la variazione di temperatura subita dal corpo¹.

In Tabella 3.1 sono riportati i valori di densità e calore specifico per alcune sostanze solide.

In linea di principio la misurazione del calore specifico di una sostanza solida non sembra difficile. Il cilindretto di cui si vuole misurare il calore specifico viene immerso in acqua alla temperatura di ebollizione ($100\text{ }^{\circ}\text{C}$) per qualche secondo in modo che si porti a $T_{>} = 100\text{ }^{\circ}\text{C}$, viene quindi immerso in acqua la cui temperatura $T_{<}$ è stata misurata in precedenza; la temperatura di equilibrio $T_{=}$ viene misurata. Sia M_c la massa del corpo di calore specifico q_c e M_a la massa dell'acqua di calore specifico q_a : la legge di conservazione dell'energia dichiara che la quantità di energia ceduta dal corpo $Q_{\rightarrow}$ viene assorbita dall'acqua $Q_{\leftarrow}$. Si ha:

$$Q_{\rightarrow} = q_c M_c (T_{>} - T_{=}) \quad \text{e} \quad Q_{\leftarrow} = q_a M_a (T_{=} - T_{<}); \quad (3.4)$$

è opportuno a questo punto notare che le due quantità $Q_{\rightarrow}$ e $Q_{\leftarrow}$ scritte in questo modo sono entrambe positive; esse debbono essere eguali: $Q_{\rightarrow} = Q_{\leftarrow}$

$$q_c M_c (T_{>} - T_{=}) = q_a M_a (T_{=} - T_{<}); \quad (3.5)$$

da cui

$$q_c = \frac{q_a M_a (T_{=} - T_{<})}{M_c (T_{>} - T_{=})}. \quad (3.6)$$

Come si vede in queste relazioni, la conservazione dell'energia rappresenta la legge fondamentale usata per la determinazione del calore specifico. È l'energia la quantità che si conserva; la temperatura entra nei calcoli come quantità ausiliaria: la sua presenza è dovuta alla definizione stessa di calore specifico.

Complicazioni concettuali entrano nel problema: il recipiente in cui viene immerso il cilindretto partecipa al processo di scambio di calore, si deve riscaldare pure e va tenuto in considerazione nel bilancio energetico. La cosa più ovvia da fare sarebbe la determinazione del calore specifico del recipiente e l'inclusione dell'energia termica assorbita dal recipiente

¹La notazione usata cerca d'essere intuitiva. $T_{>}$ e $T_{<}$ e $T_{=}$ sono la temperatura più alta, più bassa e di equilibrio. Una freccia verso sinistra indica entrante ($Q_{\leftarrow}$ calore entrante), verso destra indica uscente ($Q_{\rightarrow}$ calore uscente) e via dicendo.

nei calcoli. Questo non è semplice neanche da definire: il recipiente generalmente è un termos il cui calore specifico non è concetto chiaro e distinto. La maniera di uscirne fuori è quello di introdurre il concetto di capacità termica. Per definizione la capacità termica C di un corpo è definita come la quantità di calore che occorre fornire al corpo per innalzarne la temperatura di un grado²; in formule:

$$C = \frac{Q_{\leftarrow}}{\Delta T} \quad (3.7)$$

oppure introducendo il concetto di equivalente in acqua del recipiente che risponde alla seguente domanda: *a quanta massa d'acqua corrisponde il comportamento del recipiente?* Ovvero: il recipiente ha lo stesso effetto di una quantità maggiore di acqua contenuta nel recipiente stesso: quanto è questa massa fittizia aggiuntiva M_+ ? La determinazione di M_+ viene fatta introducendo una massa M_a nota di acqua alla temperatura di ebollizione $T \geq 100$ °C nel termos e misurando la temperatura finale T_F dopo termalizzazione (cioè dopo aver lasciato trascorrere un breve intervallo di tempo, in modo tale che le diverse parti raggiungano la stessa temperatura) e raggiungano quindi l'*equilibrio termico*³. Si usa sempre la conservazione dell'energia: calore uscente uguale a calore entrante:

$$q_a M_a (T_{>} - T_F) = q_a M_+ (T_F - T_{<}) \Rightarrow M_+ = \frac{M_a (T_{>} - T_F)}{(T_F - T_{<})} \quad (3.8)$$

naturalmente la speranza è che M_+ venga non troppo grande.

Gli Allievi sono invitati a discutere e prendere nota delle difficoltà nella determinazione della massa d'acqua M_a . Essa deve essere determinata prima del riscaldamento alla temperatura di ebollizione: dopo si raffredderebbe ma durante il riscaldamento evaporazione interviene (insomma un macello). Probabilmente l'uso di un coperchio e di un recipiente graduato che resista al fornello elettrico aiuterebbe un po'. La quantità M_+ va inserita

²Occorre aver chiaro che il calore specifico è una quantità caratteristica di ogni sostanza; la capacità termica invece si riferisce al particolare corpo in considerazione.

³È da notare che la definizione di temperatura viene data proprio in termini di questa proprietà: si definisce, infatti, temperatura quella grandezza fisica che si eguaglia quando si mettono a contatto due corpi. È questo il principio zero della termodinamica.

nella formula del calore specifico sopra scritta ad accrescere la massa dell'acqua M_a :

$$q_c M_c (T_{>} - T_{=}) = q_a (M_a + M_+) (T_{=} - T_{<}) \Rightarrow \\ \Rightarrow q_c = \frac{q_a (M_a + M_+) (T_{=} - T_{<})}{M_c (T_{>} - T_{=})}. \quad (3.9)$$

Una misurazione fatta durante gli incontri fra Insegnanti ha dato $M_+ = 3$ g per l'equivalente in acqua di uno dei termos usati.

3.2 Dilatazione termica dei solidi

Obiettivi: ...

Concetti: ...

Materiali: ...

3.2.1 Introduzione

Tutti i corpi cambiano le proprie dimensioni al variare della temperatura. Questa proprietà sta alla base della costruzione dei termometri il cui scopo è quello di misurare la temperatura. Fedeli alla nostra convinzione che il processo di misurazione definisca la quantità misurata, deduciamo che, in un modo o nell'altro, la dilatazione termica dei corpi fornisca una delle definizioni operative di temperatura. Per semplicità, al momento ci occuperemo della dilatazione lineare, cioè dell'allungamento di un corpo lungo e sottile (un filo, un tubicino ...). Avremo a che fare solo con variazioni di temperatura per cui non è necessario specificare se esprimeremo le temperature in °C (un tempo detta centigrada, oggi Celsius) o K (Kelvin, temperatura assoluta). Tuttavia in assenza di indicazioni specifiche la temperatura va sempre considerata in K.

La legge della dilatazione termica dice che per una variazione piccola (infinitesima) della temperatura ΔT (dT) l'allungamento è proporzionale alla lunghezza; sia $L(T)$ la lunghezza di un corpo alla temperatura T . La legge della dilatazione recita che alla temperatura $T + \Delta T$ la lunghezza è data da:

$$L(T + \Delta T) = L(T) + \lambda L(T) \Delta T = L(T) (1 + \lambda \Delta T). \quad (3.10)$$

Questa è una legge empirica che tuttavia vale come definizione del coefficiente di dilatazione lineare; le ipotesi che vi stanno sotto sono:

1. che la variazione di temperatura ΔT sia piccola;
2. che il coefficiente di dilatazione termico λ sia costante, indipendente dalla temperatura⁴.

3.2.2 Approfondimenti

Per lo studente che voglia saperne di più di quanto debba sapere, è possibile dare una trattazione migliore della legge di dilatazione termica; essa recita:

$$\begin{aligned} dL = \lambda L dT \Rightarrow \frac{dL}{L} = \lambda dT \Rightarrow \int_{L(T)}^{L(T+\Delta T)} \frac{dL}{L} &= \lambda \int_T^{T+\Delta T} dT \Rightarrow \\ \Rightarrow \ln \frac{L(T+\Delta T)}{L(T)} &= \lambda \Delta T \Rightarrow L(T+\Delta T) = L(T)e^{\lambda \Delta T} \end{aligned} \quad (3.11)$$

Per piccole variazioni della temperatura e ricordando che lo sviluppo in serie dell'esponenziale è⁵:

$$e^x = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{x^n}{n!} = 1 + x + \frac{x^2}{2!} + \dots \quad (3.12)$$

la legge esponenziale diventa quella lineare appena data:

$$L(T+\Delta T) = L(T)(1 + \lambda \Delta T). \quad (3.13)$$

3.2.3 Descrizione dell'esperienza

Durante gli incontri congiunti di cui si è parlato, è stata realizzata la seguente esperienza. Sono state misurate le lunghezze di due tubicini (metallici, ma perché metallici e non di

⁴Il lettore attento potrebbe chiedersi se le due ipotesi non siano in qualche modo legate; ebbene lo sono: se la variazione di temperatura non è grande allora λ si può considerare costante. Occorre capire che le variazioni di temperatura vanno considerate percentualmente piccole in rapporto alla temperatura assoluta (K). Pertanto il passaggio dalla temperatura di 37 °C a quella di 40 °C (assenza di febbre - febbre alta) apparentemente sembra essere del 10% circa ma è solo dell'1% in K. Dunque il corpo umano è un termostato accuratissimo che mantiene la propria temperatura costante con una precisione dell'1%.

⁵Il ! dopo un intero n non denota stupore per la presenza di n tipo "perbacco, compare la n qua" ma denota una precisa espressione matematica: $n! = 1 \cdot 2 \cdot 3 \cdot \dots \cdot n$ e si chiama n fattoriale.

gomma e resina?) a temperatura ambiente e mentre si fa passare (e da lungo tempo) nel tubicino vapor d'acqua. I valori misurati sono riassunti in Tabella 3.2.

La complicazione consiste nel fatto che risulta difficile misurare la temperatura T_f di un tubo attraversato da vapore. Più semplice sembra la misurazione della temperatura del vapore che fuoriesce dall'estremità del tubicino. Sventuratamente, l'altezza del mercurio del termometro movesi come *taddarita* nella notte scura e il vapore che condensa lungo il termometro non aiuta l'osservazione. Presbiopia dello scrivente e distanza microscopica fra le tacche termometriche rende la determinazione del numero delle cifre significative in T_f una chimera. L'Allievo interessato potrebbe interrogarsi sull'opportunità di isolare il tubicino metallico rivestendolo di gomma o avvolgendolo di sparadrappo⁶ al fine di ridurre la dispersione termica in aria e di uniformare la temperatura delle pareti del tubicino.

3.2.4 Approfondimenti

Per l'Insegnante che volesse dare una trattazione completa del problema a uso dello Studente supercurioso⁷, riportiamo a mo' di ausilio e promemoria la trattazione in caso si volesse considerare anche la dipendenza dalla temperatura del coefficiente di dilatazione termica λ .

⁶Chiedere ai propri genitori cosa è lo sparatràp.

⁷Non necessariamente lo stesso di prima!

Sostanza	T_i (°C)	T_f (°C)	L (cm)	ΔL (cm)	λ (10^{-6} K ⁻¹)	λ (10^{-6} K ⁻¹)
presunta					misurato	presunto
rame (?)	19.5	100	67.5	0.09	16.6	16.6
alluminio	18.8	97	67.5	0.12	22.7	23.0
ottone						19.0

Tabella 3.2: Valori misurati del coefficiente di dilatazione termica di varie sostanze.

Adunque, per definizione

$$\begin{aligned}\lambda(T) &\equiv \frac{1}{L(T)} \frac{dL}{dT} \Rightarrow \int_{L(T)}^{L(T+\Delta T)} \frac{dL}{L} = \int_T^{T+\Delta T} \lambda(T) dT \Rightarrow \\ &\Rightarrow \ln \frac{L(T+\Delta T)}{L(T)} = \int_T^{T+\Delta T} \lambda(T) dT \Rightarrow L(T+\Delta T) = L(T) \exp \left(\int_T^{T+\Delta T} \lambda(T) dT \right) \cong \\ &\cong L(T) \left\{ 1 + \int_T^{T+\Delta T} \lambda(T) dT \right\} \cong L(T) \{ 1 + \lambda(\bar{T}) \Delta T \} \quad (3.14)\end{aligned}$$

dove $\bar{T}$ è la temperatura media nell'intervallo o una temperatura rappresentativa presa nell'intervallo.

Va tuttavia ricordato che tutta l'accuratezza analitica e matematica qui esposta ha il sapore di pura accademia. L'incertezza nel valore numerico sperimentale del coefficiente di dilatazione λ fa sí che quanto si guadagna nello svolgere i conti bene sia sfocato dalla incertezza sperimentale ⁸.

3.3 Legge di stato dei gas perfetti

Obiettivi: ...

Concetti: ...

Materiali: ...

È interessante vedere cosa succede per i gas perfetti per i quali vale la legge di stato

$$PV = nRT \quad (3.15)$$

dove P è la pressione del gas, V il volume e T la temperatura (in K).

Nell'assunzione che i gas nobili (ma reali) a bassa densità e pressione e a grande volume possano essere considerati perfetti, questa legge offre una definizione operativa di temperatura. Sia T_0 la temperatura in K corrispondente a 0 °C, allora $T = T_0 + \Delta T$ e ΔT coincide numericamente con la variazione di temperatura in gradi centigradi. Allora, in questa nuova

⁸In altre parole: tempo perso. È tempo perso eliminare una piccola fonte di errore (per esempio 1%) e lasciare una maggiore (p.e. 10%).

notazione, la legge di stato dei gas perfetti recita:

$$PV = nR(T_0 + \Delta T). \quad (3.16)$$

A pressione costante si ha:

$$V = \frac{nR(T_0 + \Delta T)}{P} = \frac{nRT_0}{P} + \frac{nR}{P}\Delta T \quad (3.17)$$

orbene, $V_0 = nRT_0/P$ è il volume V_0 alla temperatura T_0 a quella pressione. Dunque

$$V = V_0 + \frac{nR}{P}\Delta T = V_0 \left(1 + \frac{nR}{PV_0}\Delta T \right) = V_0(1 + \Gamma\Delta T) \quad (3.18)$$

in questo modo la legge assume la forma della legge di dilatazione dei solidi ma ne è diversa per significato: V_0 è il volume alla temperatura fissata di 0 °C.

Una semplice esperienza condotta (sempre durante gli incontri congiunti) ha permesso il controllo della legge di stato dei gas perfetti. La pressione differenziale ΔP (in bar) è stata misurata in funzione della lunghezza di un cilindro ermeticamente chiuso e contenente aria. I valori misurati sono riportati nella Tabella 3.3.

Nella Figura 3.1 viene mostrato un grafico in cui in ascissa viene riportato il volume del cilindro e in ordinata la pressione in bar⁹ misurata all'interno del cilindro; (in verità in ordinata viene data la lunghezza del cilindretto in cm e non il volume sicché sembra che i grafici siano poco significativi ma invece sono perfettamente adeguati allo scopo; lo studente rifletta sul perché.)

La Fig. 3.2 mostra la pressione in scala semi-logaritmica.

L'esperimento è semplice nella sua realizzazione pratica, tuttavia lo studente deve mostrare particolare cura nel lasciare un certo lasso di tempo prima di misurare la pressione; infatti compressione o dilatazione produce variazione di temperatura del gas. L'intervallo di tempo permetterà al gas di portarsi alla stessa temperatura (supposta costante) dell'ambiente. Lo Studente è invitato a mettere in grafico la precedente tabella usando scale lineari, semi-logaritmiche¹⁰ e logaritmiche per vedere che succede. Riflessione preventiva sulle scale da usare risulta utile.

⁹L'unità di misura della pressione nel sistema SI è il Pascal (Pa): 1 bar = 1.013×10^5 Pa.

¹⁰Che si mette nell'asse lineare, la lunghezza o la pressione? Proviamo prima con l'una e poi con l'altra? Che deve venire di diverso? Ma che sono i logaritmi? L'aggiunta di uno zero fa passare da 1 a 10 oppure da 10 a 100. Non è strano? Che stramberia che sono i numeri! Meglio studiare latino!

L (cm)	ΔP (bar)	P (bar)
24.0	-0.50	0.50
22.0	-0.45	0.55
20.0	-0.40	0.60
18.0	-0.35	0.65
16.0	-0.25	0.75
14.0	-0.15	0.85
12.0	0.00	1.00
10.0	0.15 – 0.20	1.15 – 1.20
8.0	0.45	1.45
6.0	0.92	1.92
4.0	1.76	2.76
3.0	2.55	3.55

Tabella 3.3: Valori misurati della pressione in funzione del volume a temperatura ambiente.

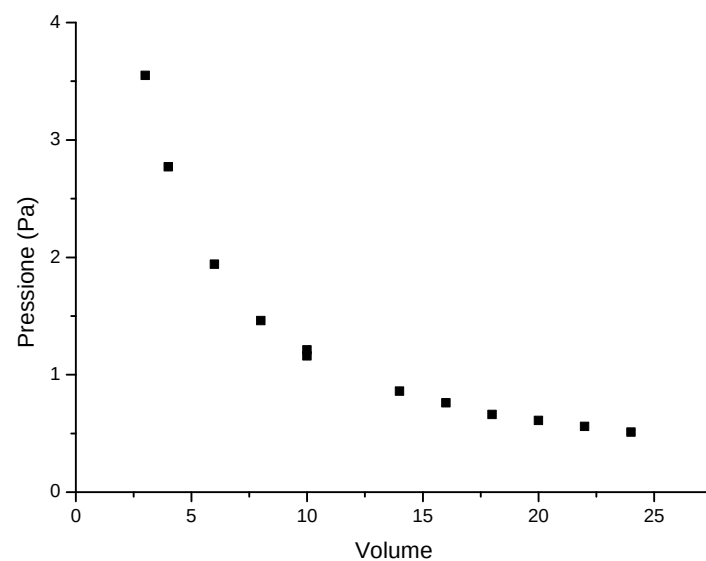


Figura 3.1: Andamento della pressione in funzione del volume in una scala lineare.

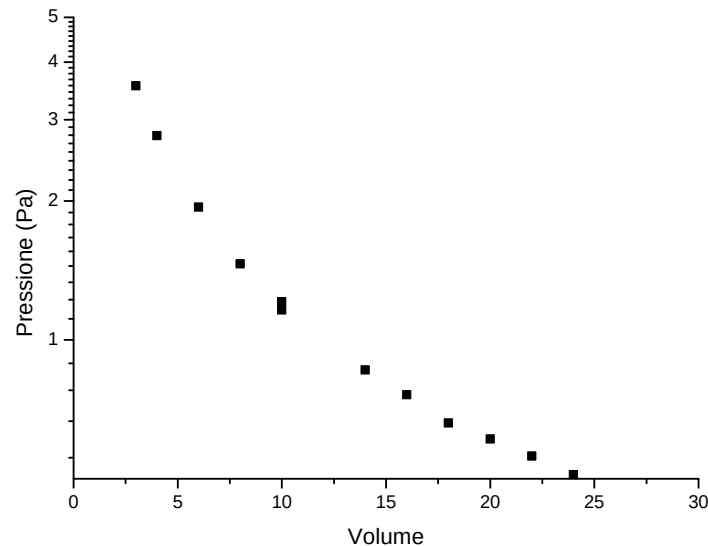


Figura 3.2: Andamento della pressione in funzione del volume in una scala semi-logaritmica.

3.3.1 Digressione

Il giovane Studente che alla domanda *a che potenza occorre elevare 10 per ottenere 100?* rispondesse 2 avrebbe, senza saperlo calcolato il primo Logaritmo (maiuscolo) della propria vita. Il Logaritmo (maiuscolo) infatti non è altro che la potenza da dare al 10 per ottenere il risultato. Così, per definizione, a

$$\text{Log } a = x \Rightarrow 10^x = a \quad (3.19)$$

così $\text{Log } 10 = 1$, $\text{Log } 100 = 2$, $\text{Log } 1000 = 3$ e così via: moltiplicare per 10 significa aumentare il Logaritmo di 1. I valori del Logaritmo per numeri non multipli di 10 non sono facili da trovare e si trovano tabulati nei libri a ciò destinati. Le tavole dei logaritmi un tempo erano immancabili in ogni biblioteca; oggidì una qualsiasi calcolatrice da pochi spiccioli fornisce il valore cercato. In qualche maniera il logaritmo è l'operazione inversa dell'elevazione a potenza: supponiamo di scrivere $x^y = z$; se l'incognita è z facciamo una operazione di potenza, se l'incognita è x facciamo un'operazione di radice, se l'incognita è l'esponente y allora calcoliamo un logaritmo (in base x).

Nella Fig. 3.3 i dati vengono mostrati in scala log-log e mostrano che la legge di stato

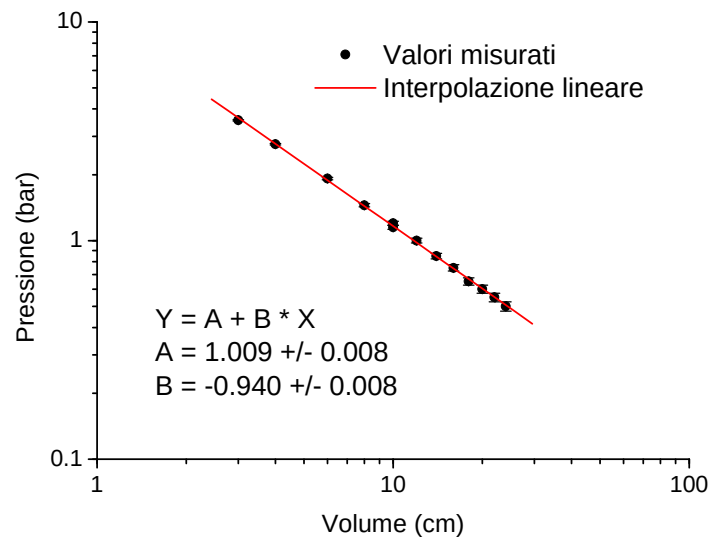


Figura 3.3: Andamento della pressione in funzione del volume in una scala logaritmica.

dell'aria è

$$PV^B = K \quad (3.20)$$

con $B = 0.940 \pm 0.008$.

Per i gas perfetti $B = 1$ e pertanto il miscuglio che forma l'aria si comporta in modo non molto diverso dai gas perfetti.

3.4 Misura del calore latente di fusione dell'indio con il calorimetro differenziale

(by Giorgio Schirò e Giuseppe Bellavia)

Diversi processi in Fisica e Chimica come le reazioni chimiche, le transizioni tra stati di aggregazione della materia o il mescolamento di sostanze diverse per formare soluzioni comportano il rilascio o l'assorbimento di energia sotto forma di calore. La calorimetria misura la quantità di calore assorbita o ceduta da un campione quando esso viene riscaldato, raffreddato o mantenuto a una temperatura costante.

Il principio di funzionamento del calorimetro differenziale è il seguente. Il campione e il materiale di riferimento sono disposti in due fornaci indipendenti (termicamente isolate fra



Figura 3.4: Calorimetro differenziale.

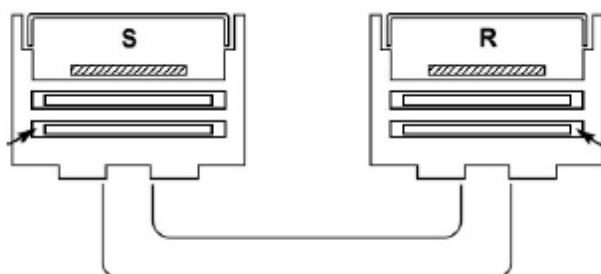


Figura 3.5: Rappresentazione schematica del principio di funzionamento del calorimetro differenziale.

di loro) e mantenute alla stessa temperatura. Quando viene fatta variare la temperatura delle fornaci (scansione), il calorimetro fornisce o assorbe potenza in quantità differente dal campione e dal riferimento. La differenza di potenza richiesta per mantenere il campione e il riferimento alla stessa temperatura durante la scansione è direttamente proporzionale al calore specifico

$$\text{calore specifico} = \frac{1}{M} \times \frac{\text{potenza}}{\text{velocità di scansione}}, \quad (3.21)$$

in formule

$$q = \frac{1}{M} \frac{dQ}{dT} = \frac{1}{M} \frac{dQ/dt}{dT/dt}. \quad (3.22)$$

Per ricavare il calore specifico di un campione in esame bisogna misurare, quindi, la potenza dQ/dt fornita dal calorimetro. Conoscendo la velocità di scansione della temperatura e la massa del campione si può ottenere il calore specifico del campione in esame.

La materia può essere presente in natura in diverse fasi o stati, caratterizzati da uniforme composizione chimica e proprietà fisiche (p.e. densità, struttura, indice di rifrazione, ecc.). La caratteristica distintiva di una transizione da una fase a un'altra della materia è il brusco cambiamento di una o più proprietà fisiche. In particolare le transizioni possono essere suddivise in

transizioni del primo ordine: sono quelle che coinvolgono un calore latente λ , cioè una quantità di energia per unità di massa necessaria per ottenere la transizione;

transizioni del secondo ordine: non coinvolgono un calore latente e sono caratterizzate da una discontinuità nella derivata seconda dell'energia libera rispetto alle variabili termodinamiche¹¹, per esempio il calore specifico.

Il calorimetro differenziale permette di misurare, oltre alla temperatura di transizione, anche il calore latente di fusione del campione in esame. In Figura 3.6 è mostrato l'andamento con la temperatura della potenza assorbita in un campione di Indio di massa $m = 6.13$ mg. Dalla curva si vede che la temperatura di fusione dell'Indio è $T_f = 157.3$ K; la transizione è una transizione di fase del I ordine con un calore latente dato dall'area sotto il picco, che corrisponde a un valore $\lambda \approx 30$ J/g.

¹¹Si veda p.e. G. Boato, *Termodinamica*, CEA

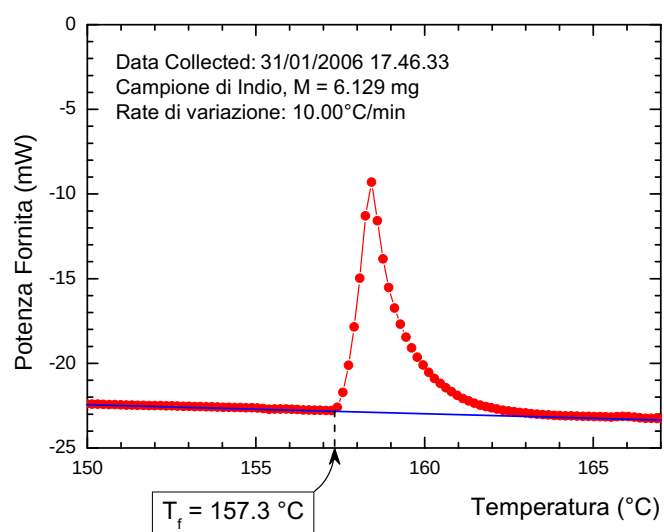


Figura 3.6: Transizione di fase dell'indio misurata con il calorimetro differenziale.

Capitolo 4

Realizzazione di esperienze con l'uso di sensori *online*

Con la diffusione dei personal computer (PC) e l'elettronica digitale, diverse aziende hanno sviluppato vari dispositivi che permettono di usare il PC come strumento di misura, per mezzo di sensori di rivelazione collegati direttamente al PC. Con questi dispositivi si può realizzare un'ampia varietà di esperimenti in cui l'acquisizione dei dati sperimentali avviene in tempo reale e per questo motivo questi dispositivi sono chiamati sensori *online*.

4.1 Misura del coefficiente di attrito statico e dinamico

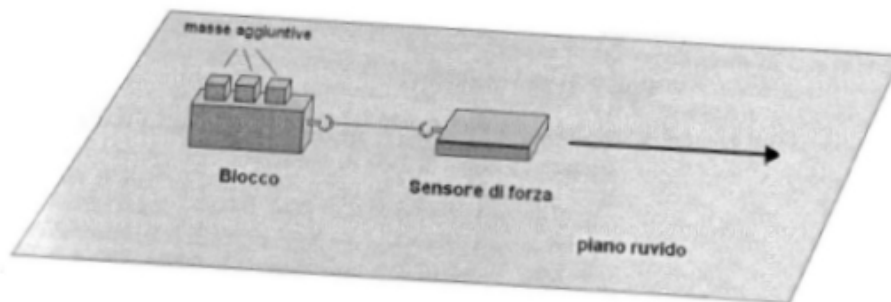
La misurazione del coefficiente di attrito statico e dinamico può essere realizzata agevolmente per mezzo dei sensori *online*. In particolare, per queste esperienze è necessario di un sensore di forza, di cui un tipo è mostrato in Figura 4.1.

4.1.1 Descrizione dell'esperienza

L'esperienza viene eseguita agganciando il sensore di forza a un blocco di legno di massa M , come mostrato in Figura 4.2.



Figura 4.1: Sensore di forza[10].

Figura 4.2: Descrizione della procedura per effettuare le misure di attrito statico e dinamico con i sensori *online*.

Rilevando con il sensore collegato al PC i valori della forza a partire da quando si incomincia a tirare il blocco, si ottengono i dati mostrati nel grafico di Figura 4.3.

Dal grafico della forza in funzione del tempo ricaviamo i valori delle grandezze: $F_{STA} = 90 \times 10^{-3}$ N, $F_{DIN} = 62 \times 10^{-3}$ N. Conoscendo il peso del corpo $P = Mg = 15 \times 10^{-3}$ kg $\times$ 9.81 m/s² possiamo determinare il coefficiente di attrito statico come

$$\mu_s = \frac{F_{STA}}{Mg} = \frac{90 \times 10^{-3}}{15 \times 10^{-3} \times 9.81} = 0.61. \quad (4.1)$$

Per determinare il valore migliore del coefficiente di attrito statico e la sua indeterminazione, bisogna fare molte misurazioni nelle stesse condizioni e quindi calcolare il valore medio e la deviazione standard della media.

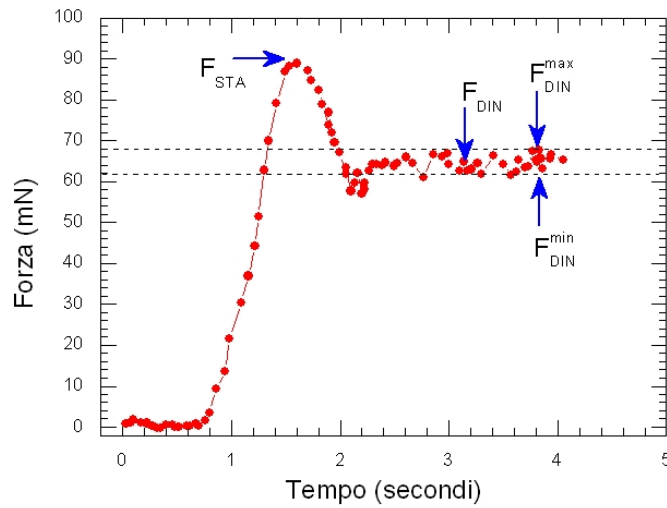


Figura 4.3: Andamento della forza di attrito in funzione del tempo, a partire da quando si incomincia a tirare il blocco.

Il coefficiente di attrito dinamico si calcola invece come

$$\mu_d = \frac{F_{DIN}}{Mg} = \frac{62 \times 10^{-3}}{15 \times 10^{-3} \times 9.81} = 0.42. \quad (4.2)$$

I valori numerici dati nelle due espressioni precedenti sono quelli di un'esperienza svolta durante gli incontri congiunti degli Insegnanti.

Per determinare il valore migliore del coefficiente di attrito dinamico e la sua indeterminazione, si può procedere in due modi.

- a) Ripetere le misurazioni molte volte nelle stesse condizioni e quindi calcolare il valore medio e la deviazione standard della media.¹
- b) Ricavare graficamente il valore massimo e minimo della forza di attrito dinamico (individuati dalle linee tratteggiate mostrate in Figura 4.3) e quindi calcolare l'indeterminazione come semi differenza tra il valore massimo e il valore minimo del coefficiente

¹La deviazione standard della media $\sigma_{\bar{x}}$ è definita come:

$$\sigma_{\bar{x}} = \sqrt{\sum_{i=1}^N \frac{(x_i - \bar{x})^2}{N(N-1)}}.$$

Per una discussione vedere per esempio ref. [5]

di attrito ottenuto

$$\mu_{best} = (\mu_{max} + \mu_{min})/2, \quad (4.3)$$

$$\delta\mu = (\mu_{max} - \mu_{min})/2. \quad (4.4)$$

Il sensore di forza può essere usato anche per studiare le forze impulsive durante gli urti, i moti armonici, la forza centripeta, ecc.

4.2 Studio della legge di Boyle

É possibile studiare la legge di stato dei gas perfetti con acquisizione computerizzata delle quantità per mezzo dei sensori *online*. Noi abbiamo studiato la legge di Boyle. Per eseguire questa esperienza usiamo il sensore di pressione *online* che sostituisce i tradizionali manometri. La valvola di connessione è ora direttamente sul corpo del sensore, in modo da facilitare le misurazioni e l'acquisizione dei dati.



Figura 4.4: Sensore di pressione [10].

L'apparato per lo studio della legge di Boyle è mostrato in Figura 4.5.

L'apparato comprende: siringa graduata in plastica dura con adattatore a vite, tubo in plastica con connettori a vite, tappo in gomma a due fori con adattatore a vite, tappo in gomma a un foro con adattatore a vite, valvola a due vie.

Altri esperimenti che si possono realizzare con questo sensore sono lo studio della II legge di Gay-Lussac, lo studio della tensione di vapore di liquidi, ecc.

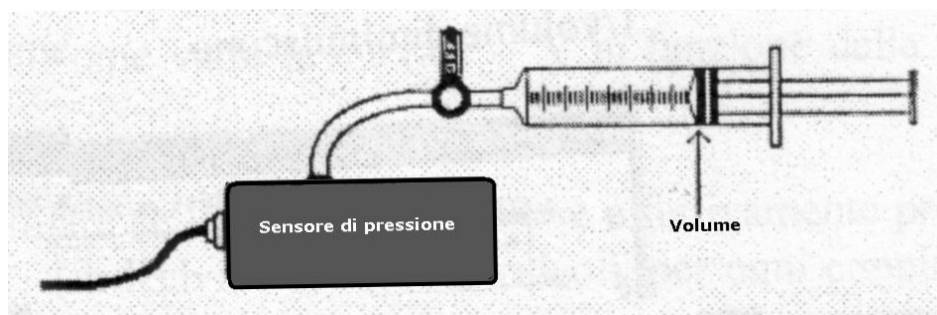


Figura 4.5: Apparato per lo studio della legge di Boyle con il sensore di pressione.

Capitolo 5

Valutazione dell'attività svolta dagli studenti

Dopo l'esperimento, lo studente deve preparare una relazione che deve trattare i seguenti punti:

- a) descrizione dell'esperimento scelto;
- b) concetti, leggi, modelli oggetto di indagine; cioè, la fisica del problema, con discussione esplicita dei risultati attesi e delle ipotesi di partenza;
- c) materiali utilizzati;
- d) come è stato eseguito l'esperimento (procedimento sperimentale e di misura);
- e) risultati ottenuti: presentazione adeguata dei dati raccolti possibilmente mediante tabelle e grafici, discutendo esplicitamente i seguenti punti:
 - ripetibilità e affidabilità delle misure;
 - incertezza delle misure (anche solo a livello di stima);
 - conclusioni che si possono trarre direttamente circa la verifica delle ipotesi, concetti, leggi, modelli, ecc., che sono stati oggetto di indagine.

5.1 Esempio di scheda di relazione degli Allievi

Titolo dell'esperimento: ...

Scopi dell'esperimento:

- indagare
- misurare
- ...

Strumentazione e materiale a disposizione:

- metro a nastro, ...
- ...

Attività, misure, calcoli:

- Tabella, che raccoglie le misure delle grandezze in esame.
- Grafico relativo a ...
- ...

Commenti, osservazioni, proposte:

- ...

5.2 Esempio di griglia di valutazione dell'attività di laboratorio

Titolo dell'esperimento:

Data:

Studente	Gruppo	Correttezza dei dati	Presentaz. dei dati	Discus. dei risultati	Impegno	Giudizio comples.

Ringraziamenti

Si ringraziano

il Liceo Scientifico “Cannizzaro”

il Liceo Scientifico “Galilei”

il Liceo Classico “Garibaldi”

l’I.T.I.S. “A. Volta”

il Dipartimento di Scienze Fisiche e Astronomiche

il Dipartimento di Fisica e Tecnologie Relative

l’Osservatorio Astronomico “G. Vaiana”

il Laboratorio di Calorimetria del DSFA

tutti gli insegnanti e tecnici che hanno contribuito allo svolgimento delle attività del progetto
Lauree scientifiche.

Bibliografia

- [1] P. Cerreta, *Gli Esperimenti dell'Exploratorium*, Zanichelli (Bologna 1996).
- [2] D. Haliday, R. Resnick, J. Walker, *Fondamenti di Fisica*, CEA (Milano).
- [3] R. A. Serway, *Principi di Fisica*, EdiSES (Napoli).
- [4] G. Boato, *Termodinamica*, CEA (Milano).
- [5] J. R. Taylor, *Introduzione all'Analisi degli Errori: lo studio delle incertezze nelle misure fisiche*, Zanichelli II Ed. (Bologna 1999).
- [6] G. Cannelli, *Metodologie Sperimentali in Fisica*, Edises (Napoli 2000).
- [7] U. Haber-Schaim, J. H. Dodge, R. Gardner, E. A. Shore, *Fisica a cura del PSSC* (Comitato per lo studio della Scienza Fisica) *Guida al Laboratorio*, Zanichelli (Bologna).
- [8] U. Amaldi, *Fisica per Temi: laboratorio*, Zanichelli (Bologna 1995).
- [9] *Libreria di Esperimenti di Fisica*, ML SYSTEMS Palermo.
- [10] Vernier è un marchio registrato, tutti i diritti sono riservati.

Indice analitico

A

Acquisizione dei dati sperimentali, 3

Analisi dei dati sperimentali, 3

Attrito

coefficiente di attrito, 37

dinamico, 37

statico, 11, 37

misura del coefficiente di attrito, 11

C

Calore specifico, 21, 23, 33

Calorimetro, 25

differenziale, 33

equivalente in acqua, 26

Costante elastica, 18

D

Densità, 23

Dilatazione termica dei solidi, 26

E

Errore

assoluto, 5

di parallasse, 4

relativo, 5

Errori, 3

casuali, 5

valutazione, 3

sistematici, 5

Esperienze di laboratorio, 11, 21

F

Forza elastica, 18

G

Griglia di valutazione, 45

I

Indio, 33

L

Legge di Boyle, 40

Legge di Hooke, 18

Legge di stato dei gas perfetti, 29

M

Molla elicoidale, 17

taratura, 17

P

Peso specifico, 23

Piano inclinato, 12

Principio di conservazione dell'energia, 17

R

Rappresentazione grafica, 6

di dati sperimentali, 7

di una funzione, 6

Retta di massima pendenza, 8

Retta di minima pendenza, 8

S

Sensori, 37

di forza, 37

di pressione, 40

online, 37

T

Tabella di valutazione, 43

V

Valutazione degli studenti, 43

Vettori, 14

scomposizione, 12, 15