

Docenti e studenti a confronto su:

**LO STUDIO DELL' ARIA
E DEI FENOMENI ATMOSFERICI**
Osservare e sperimentare nella scienza.

Firenze, 19-20 aprile 2023

PRIMO CLASSIFICATO

SEZIONE TESINE BIENNIO

PALLONCINI ED ELICOTTERI DI CARTA.
L'EFFETTO DELL'ARIA SUL MOTO DEI CORPI

Studenti

Baiano Michela - Bergamaschi Beatrice - Grecchi Nicoletta - Pecora Luca –
Vaccari Annalisa

Classi 2T - 2Z

Istituto di Istruzione Superiore

Liceo scientifico A. Cesaris
Casalpusterlengo (LO)

Docente Coordinatore

Giannelli Fabrizio

Gli studenti hanno verificato la relazione tra la forza di attrito viscoso e la velocità limite. I risultati delle misure, determinati con precisione, sono stati elaborati con solida consapevolezza; le misure sono state eseguite anche con aeroplani di cartoncino, specificamente progettati, realizzati e testati. Lo sviluppo teorico, ben scandito, contestualizza rigorosamente il lavoro sperimentale. L'attività, condotta con rigore e sistematicità nella fase di raccolta dei dati sperimentali, conduce a un convincente confronto con i modelli teorici.

Palloncini ed elicotteri di carta
L'effetto dell'aria sul moto dei corpi
Sezione biennio

I cinque ragazzi coinvolti in questo progetto frequentano il secondo anno del Liceo Scientifico OSA. Il programma di fisica del secondo anno prevede essenzialmente lo studio dei moti.

In relazione a questo tema una delle idee sbagliate, più diffuse tra i ragazzi, è quella secondo la quale gli oggetti cadono più velocemente se più pesanti. Lo scopo di questo lavoro è stato quello di chiarire quali siano gli aspetti che influenzano la caduta dei corpi sulla superficie terrestre ed in particolare qual è il ruolo dell'aria in questo fenomeno. Questo è stato fatto utilizzando dei palloncini in caduta (riempiti con aria) e in risalita (riempiti con elio) e degli elicotteri di carta. In quest'ultimo caso abbiamo preso spunto da un articolo pubblicato su LFnS.

Il lavoro si è svolto tra inizio novembre e fine febbraio. Complessivamente abbiamo effettuato dieci incontri di circa 4 ore ciascuno al sabato mattina, per un totale di oltre 40 ore in presenza. Inizialmente sono stati introdotti alcuni concetti di dinamica non ancora affrontati nel normale corso di studi ed è stato dato ai ragazzi del materiale teorico riguardante l'effetto dell'aria sulla dinamica dei corpi necessario per intraprendere il lavoro. La raccolta e l'analisi dati ha previsto l'utilizzo del software Tracker e del foglio elettronico LoggerPro, strumenti già conosciuti e utilizzati dagli studenti coinvolti. Il lavoro, partito con dei semplici esperimenti sulla caduta libera, si è sviluppato seguendo un percorso non del tutto preventivato ma orientato dai risultati del lavoro sperimentale e dalle domande, dubbi, curiosità che di volta in volta sono emerse.

I risultati ottenuti, oltre a chiarire bene cosa influenza la velocità di un corpo in aria, hanno portato gli studenti, guidati dal sottoscritto, a mettere in discussione anche alcune scelte didattiche di buona parte dei testi di fisica per il liceo in relazione alla presentazione della forza di attrito viscoso.

I ragazzi hanno partecipato con impegno e responsabilità, hanno apprezzato il tipo di lavoro proposto e le modalità utilizzate.

Il referente del progetto

Palloncini ed elicotteri di carta.

L'effetto dell'aria sul moto dei corpi.

Abstract

With this project work we wanted to check how the air influences the motion of objects that fall near the Earth's surface. In particular, we've studied the motion of balloons both in fall and ascent after filling them with helium. In addition, we have verified what influences the motion of falling particular objects, which is paper helicopters.

Introduzione

Nei libri di fisica, quando si studia la cinematica, viene detto che gli oggetti sulla superficie terrestre cadono con accelerazione costante pari a $9,81 \text{ m/s}^2$. Però, è esperienza comune osservare che non tutti i corpi cadono allo stesso modo. Un foglio di carta cade più lentamente di una biglia di acciaio. Con questo lavoro abbiamo cercato di capire cosa influenza la caduta dei corpi oltre alla forza di gravità.

Preliminarmente, abbiamo voluto studiare la caduta di diversi oggetti per valutare le differenze, dal punto di vista cinematico, che emergono dall'analisi del moto dei vari corpi.

A tal proposito abbiamo utilizzato la video-analisi con il software Tracker. Da questa prima analisi è emerso che i diversi oggetti da noi usati si muovono, apparentemente, di moto uniformemente accelerato, ma le accelerazioni risultano diverse. A titolo di esempio riportiamo i diagrammi orari con relativo *fit* del moto di un piombo da pesca ($m=76,5 \text{ g}$, forma affusolata) e di una pallina di polistirolo ($m=1,00 \text{ g}$, $d=4,0 \text{ cm}$)

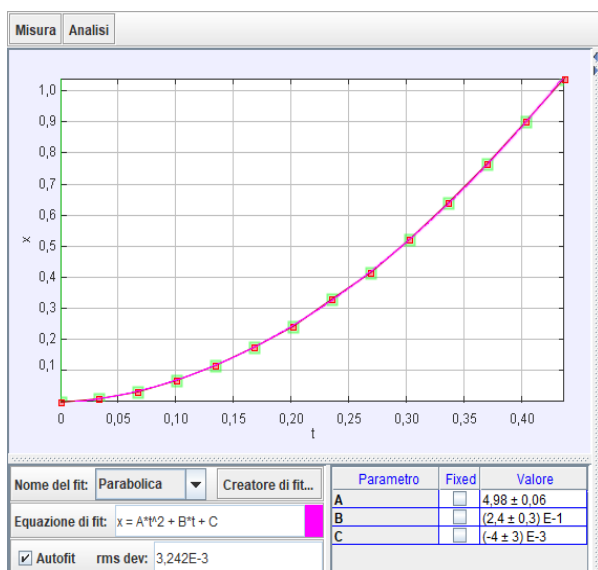


Figura 1 Diagramma orario del piombo da pesca

Come si evince dal grafico di figura 1 il piombo ha una accelerazione pari a $(9,96 \pm 0,12) \text{ m/s}^2$ in buon accordo con quanto espresso dalla teoria.

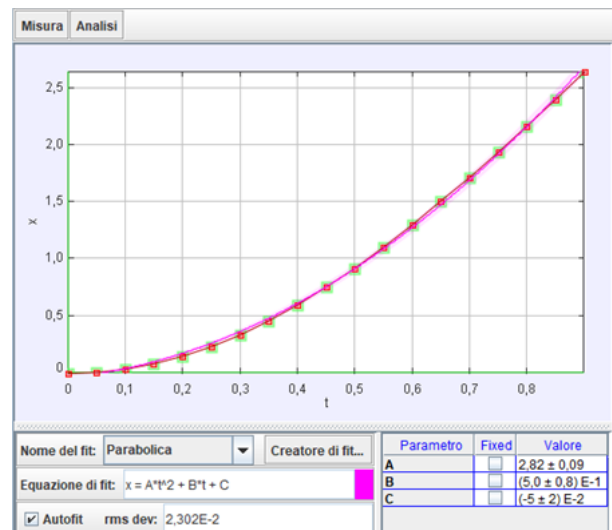


Figura 2 Diagramma orario della pallina di polistirolo

Mentre, la pallina di polistirolo cade con una accelerazione pari a $(5,64 \pm 0,18) \text{ m/s}^2$ decisamente inferiore al valore teorico di $9,81 \text{ m/s}^2$. In quest'ultimo caso analizzando il video nei primissimi istanti della caduta si trova che l'accelerazione è più grande e risulta $(7,82 \pm 0,12) \text{ m/s}^2$. Questo ci ha fatto capire che l'accelerazione durante la caduta diminuisce, vuol dire che qualcosa subentra durante il moto e cambia le condizioni cinematiche della caduta della pallina.

A questo punto, grazie ad una ricerca svolta sul nostro libro di testo [1], in internet [2] e dal confronto con il nostro professore, abbiamo scoperto che un oggetto che si muove in un fluido subisce una forza di attrito viscoso che dipende dalla forma e dalla velocità del corpo e dalle caratteristiche del fluido. In particolare, questa forza è direttamente proporzionale alla velocità se quest'ultima è "bassa", mentre è proporzionale al quadrato della velocità se quest'ultima è "alta".

Prendendo in considerazione corpi di forma sferica abbiamo scoperto che esiste la legge di Stokes che è valida per velocità basse:

$$F_{viscosa} = 6\pi \cdot \eta \cdot R \cdot v \quad (1)$$

In questa formula, η è la cosiddetta viscosità del fluido e rappresenta una sorta di coefficiente di attrito, R il raggio della sfera e v la velocità.

Un altro modello che descrive la forza di attrito che subisce un corpo in movimento in un fluido è:

$$F_{viscosa} = \frac{1}{2} \cdot C \cdot \rho_F \cdot S \cdot v^2 \quad (2)$$

C rappresenta il *coefficiente di penetrazione*, normalmente compreso tra 0,4 e 1 (nel caso delle auto è indicato con C_x e per la sfera vale 0,5), ρ_F è la densità del fluido, S è la "sezione frontale" (per una sfera di raggio R è pari a $S = \pi R^2$) e v la velocità.

Da questi due modelli si capisce che l'aria svolge un ruolo importante in relazione al moto di corpi che si muovono sulla superficie terrestre. A questo punto ci siamo posti come obiettivo quello di studiare il moto di caduta di un corpo e di capire quale tra i due modelli visti regola il moto in aria per oggetti di forma sferica. Da una prima osservazione qualitativa ci siamo accorti che gli oggetti di forma sferica a nostra disposizione (sfere di polistirolo di diverso diametro e peso) cadevano a velocità relativamente alte. Dopo un breve confronto con il nostro professore abbiamo deciso di studiare il moto di palloncini in caduta, che, pur non essendo perfettamente sferici, hanno delle caratteristiche per cui la velocità di caduta risulta bassa.

Palloncini in movimento

Prima di iniziare a descrivere gli esiti degli esperimenti effettuati è opportuno affrontare il fenomeno dal punto di vista teorico al fine di comprendere meglio i risultati che riporteremo.

Un oggetto, libero di cadere in un fluido, è sottoposto ad almeno tre forze: la forza peso; la spinta di Archimede; la forza di attrito viscoso.

Le prime due in genere sono costanti e si calcolano con le seguenti formule:

$$F_p = m \cdot g = \rho_{corpo} V_{corpo} \cdot g \quad (3)$$

$$F_A = \rho_{fluido} V_{fluidospostato} \cdot g \quad (4)$$

La terza forza, come abbiamo visto, è espressa dalla (1) o dalla (2) e, dipendendo dalla velocità del corpo, è variabile.

L'azione delle tre forze è rappresentata in figura 3.

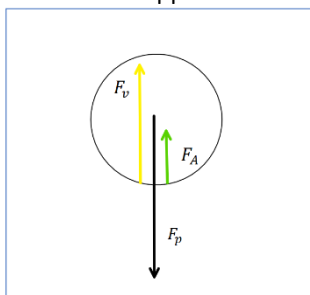


Figura 3 Rappresentazione delle forze agenti su un corpo in caduta libera

Quando il corpo si muove in aria la spinta di Archimede è piccola e il suo effetto diventa trascurabile se il corpo

ha un peso specifico elevato (es. sfera di metallo), ossia se si verifica la seguente condizione: $\rho_{corpo} \gg \rho_{fluido}$.

In particolare, se il corpo si muove in aria, la spinta di Archimede si può non considerare, in quanto, quando misuriamo la massa di un corpo con la bilancia, di fatto misuriamo la massa del corpo meno la massa di aria che sposta il corpo. Quindi, in tal caso, la forza data dal prodotto $m \cdot g$ rappresenta la risultante tra la forza peso e la forza di Archimede. Il sistema costituito da tre forze, rappresentato sopra, possiamo semplificarlo e considerare due forze: risultante peso-Archimede e forza di attrito viscoso. D'ora in poi indicheremo con forza peso la risultante tra peso e spinta di Archimede.

Quindi un oggetto in caduta è sottoposto inizialmente alla forza peso, per cui cade con accelerazione pari a g , ma quando aumenta la velocità subentra una forza viscosa che riduce la forza risultante e quindi anche l'accelerazione. In tal caso l'accelerazione risulta:

$$a = \frac{m \cdot g - F_v}{m} = g - \frac{F_v}{m}$$

Quando F_v risulta sufficientemente grande da rendere il rapporto $\frac{F_v}{m}$ pari a g , l'accelerazione diventerà nulla e il corpo si muoverà di moto uniforme.

Ora siamo in grado di interpretare correttamente quanto descritto nell'introduzione.

Nel caso del piombo, essendo la forza peso "elevata", nei primi istanti di caduta la velocità non è sufficientemente grande da generare una forza viscosa tale da influenzare l'accelerazione in modo sensibile e quindi l'accelerazione misurata risulta pari a quella gravitazionale. Mentre nel caso della pallina di polistirolo, siccome la forza peso è "piccola", basta una piccola velocità per generare una forza viscosa tale da ridurre l'accelerazione di caduta in modo sensibile già dai primi istanti di volo.

A conferma di quanto descritto sopra riportiamo un grafico della velocità di un palloncino in caduta (figura 4) ottenuto con Tracker.

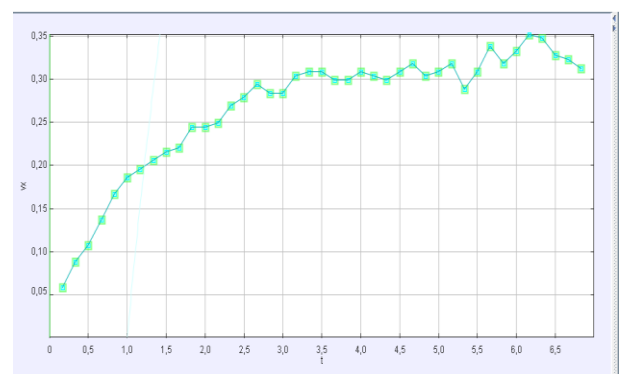


Figura 4 Velocità in funzione del tempo di un palloncino in caduta libera

Come si vede la velocità aumenta repentinamente nelle fasi iniziali, ma poi l'incremento, e quindi l'accelerazione, si riduce sempre di più fino ad annullarsi, raggiungendo quella che viene chiamata

velocità limite. La velocità limite garantisce una forza viscosa sufficiente ad “annullare” la forza peso.

Fatta questa premessa teorica passiamo a descrivere il primo esperimento vero e proprio effettuato da noi. Innanzitutto, volevamo verificare se un palloncino in caduta libera subisse una forza viscosa dipendente linearmente dalla velocità, come descritto dalla (1), o secondo una relazione di tipo quadratico come descritto dalla equazione (2). Il primo esperimento l’abbiamo effettuato sempre con lo stesso palloncino ma con masse diverse. Per variare la massa abbiamo usato delle piccole rondelle metalliche attaccate con del nastro biadesivo come in figura 5.



Figura 5 Palloncino con rondella

Attaccando le rondelle nella parte “sferica” del palloncino durante la caduta la parte che “penetra” l’aria è, appunto, sferica; questo ci consente, approssimativamente, di simulare la caduta di una sfera. Noi abbiamo effettuato una prima misura con un palloncino di diametro circa pari a 16 cm e con masse variabili da 1,40 g a 2,90 g. Il diametro dei palloncini è stato determinato avvolgendo una corda all’“equatore” del palloncino, in questo modo si misura la circonferenza da cui si determina il diametro. Abbiamo lasciato cadere il palloncino nella tromba delle scale della nostra scuola e ripreso solo il tratto finale del volo, in modo da essere certi che avesse raggiunto la velocità limite. Dal diagramma orario ottenuto con Tracker si determina la pendenza e quindi la velocità raggiunta espressa con l’errore assoluto per ogni palloncino. Conoscendo il peso del palloncino, in base a quanto detto in precedenza, si conosce la forza viscosa. Quindi abbiamo messo in relazione tale forza con le corrispondenti velocità. Il modello matematico che meglio approssima i dati sperimentali che è emerso è del tipo $F_v = k \cdot v^2$.

Prima di iniziare l’esperimento eravamo convinti che la dipendenza della forza viscosa dalla velocità fosse regolata dalla legge di Stokes. A questo punto ci siamo chiesti come potevamo ridurre la massa del palloncino per poter avere velocità limite più basse. Abbiamo pensato di gonfiarlo con dell’elio e zavorrandolo con un filo metallico (figura 6) abbiamo ottenuto “masse”

inferiori ad 1 grammo (valore corrispondente alla massa del palloncino a vuoto).



Figura 6 Palloncino con elio zavorrato con filo

In questo caso per variare la massa, di volta in volta, si è tagliato un pezzo di filo, questa procedura consente di variare la massa anche di un valore molto piccolo. Per la misura della massa abbiamo usato una bilancia con sensibilità 0,01 g. Inoltre, la parte penetrante risulta essere la parte “affusolata” del palloncino. Abbiamo effettuato diverse prove con masse equivalenti inferiori ad 1 g, i risultati ottenuti hanno dato sempre lo stesso tipo di relazione, come nel caso precedente. A titolo di esempio, di seguito, in tabella I e nel grafico in figura 7, riportiamo quanto ottenuto con masse comprese tra 0,05 g e 0,24 g.

F_v (N)	V_{limite} (m/s)
0	0
$(5 \pm 1) \cdot 10^{-4}$	$0,349 \pm 0,005$
$(9 \pm 1) \cdot 10^{-4}$	$0,397 \pm 0,004$
$(14 \pm 1) \cdot 10^{-4}$	$0,545 \pm 0,002$
$(18 \pm 1) \cdot 10^{-4}$	$0,584 \pm 0,003$
$(24 \pm 1) \cdot 10^{-4}$	$0,693 \pm 0,002$

Tabella I Legame tra forza viscosa e velocità limite

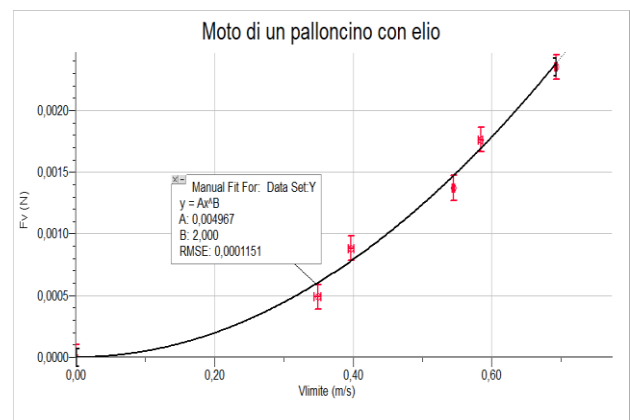


Figura 7 Andamento della forza viscosa in funzione della velocità limite

Come si evince dal grafico la relazione tra forza viscosa e velocità è sempre di tipo quadratico. Il coefficiente di proporzionalità è pari a $0,004997 \text{ kg/m}$. Da questo dato è possibile dedurre, attraverso semplici passaggi,

il coefficiente di penetrazione del palloncino. Ponendo $\rho_F = 1,23 \text{ kg/m}^3$ e $R = 0,08 \text{ m}$ si ottiene:

$$\frac{1}{2} \cdot C \cdot \rho_F \cdot S = 0,004997 \text{ ossia}$$

$$C = \frac{2 \cdot 0,004997}{\rho_F \cdot \pi \cdot R^2} = \frac{0,009994}{1,23 \cdot 3,14 \cdot 0,08^2} = 0,404$$

La costante di proporzionalità sembra essere in accordo con le caratteristiche del nostro sistema. Infatti, essendo il coefficiente di penetrazione di una sfera circa 0,5, nel nostro caso, avendo usato un oggetto di forma più affusolata, è plausibile che sia un po' inferiore.

Il risultato ottenuto ci ha sorpreso, in quanto a noi sembrava che la velocità fosse sufficientemente piccola affinché la forza viscosa dipendesse linearmente dalla velocità.

A questo punto abbiamo effettuato un ultimo tentativo. Sempre utilizzando il palloncino con elio abbiamo ridotto la zavorra fino a far prevalere la spinta di Archimede sulla forza peso. In questo modo il moto è di risalita e abbiamo pensato che si potessero ottenere velocità ancora più basse. In realtà, dall'analisi dei dati risulta che il modello che descrive la dinamica del sistema è sempre il (2), ma comunque il risultato ottenuto è interessante perché il coefficiente di penetrazione è cambiato rispetto al caso precedente e risulta praticamente uguale a quello di una sfera. Prima di discutere i risultati descriviamo come abbiamo dedotto la spinta verso l'alto e quindi la forza di attrito. Utilizzando una zavorra (filo) sufficientemente pesante si misura la massa dell'intero sistema (palloncino con filo). Poi si toglie una quantità di filo leggermente più "pesante" del sistema. La differenza tra le due masse moltiplicata per g rappresenta la risultante tra peso e spinta di Archimede, ma questa volta diretta verso l'alto. Per far comprendere meglio facciamo un esempio numerico. Supponiamo che il sistema palloncino-filo abbia una massa di 5,00 g, tagliamo un pezzo di filo che supponiamo abbia una massa di 5,05 g. Allora la spinta verso l'alto è pari al peso equivalente di una massa di 0,05 g.

In tabella II e nel grafico di figura 8 sono riportate le misure relative a questo esperimento.

F_v (N)	V_{limite} (m/s)
0	0
$(3 \pm 2) \cdot 10^{-4}$	$0,220 \pm 0,003$
$(9 \pm 2) \cdot 10^{-4}$	$0,320 \pm 0,002$
$(15 \pm 2) \cdot 10^{-4}$	$0,490 \pm 0,003$
$(19 \pm 2) \cdot 10^{-4}$	$0,542 \pm 0,004$
$(25 \pm 2) \cdot 10^{-4}$	$0,623 \pm 0,005$

Tabella II Legame tra forza viscosa e velocità limite nel caso di un palloncino in risalita

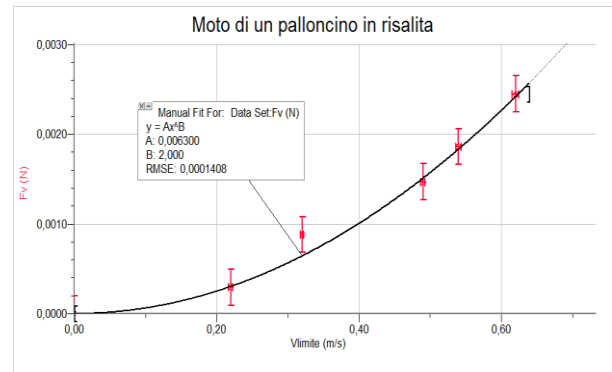


Figura 8 Andamento della forza viscosa in funzione della velocità limite nel caso di un palloncino in risalita

Come detto anche in questo caso vi è una dipendenza di tipo quadratico tra forza viscosa e velocità. Questo risultato l'abbiamo ottenuto anche con spinte inferiori a quelle riportate in tabella II, che, come si può notare, sono equivalenti a quelle riportate in tabella I. Come in precedenza si può calcolare il coefficiente di penetrazione come segue:

$$C = \frac{2 \cdot 0,0063}{\rho_F \cdot \pi \cdot R^2} = \frac{0,0126}{1,23 \cdot 3,14 \cdot 0,08^2} = 0,51$$

Quindi il palloncino durante la risalita si comporta esattamente come una sfera in caduta.

Per completare gli esperimenti con i palloncini abbiamo deciso di verificare la dipendenza di F_v dalla sezione frontale. In questo caso abbiamo ripetuto l'esperimento con palloncini gonfiati in modo da avere diversi diametri. Purtroppo, la forma risulta praticamente sferica per i palloncini più piccoli ed a forma di "pera" per quelli più grandi. Ovviamente abbiamo usato masse identiche ($1,12 \pm 0,01$) g per tutti i palloncini zavorrandoli all'occorrenza con piccoli pezzi di filo. I risultati ottenuti sono riportati nella tabella III e nel grafico di figura 9.

R(m)	V(m/s)	S (m ²)	V ² (m ² /s ²)
$0,035 \pm 0,001$	$3,28 \pm 0,04$	$(3,8 \pm 0,2) \cdot 10^{-3}$	$10,75 \pm 0,26$
$0,051 \pm 0,001$	$2,20 \pm 0,02$	$(8,2 \pm 0,3) \cdot 10^{-3}$	$4,84 \pm 0,09$
$0,061 \pm 0,001$	$1,83 \pm 0,03$	$(11,7 \pm 0,4) \cdot 10^{-3}$	$3,35 \pm 0,11$
$0,072 \pm 0,001$	$1,51 \pm 0,02$	$(16,3 \pm 0,5) \cdot 10^{-3}$	$2,28 \pm 0,06$
$0,087 \pm 0,001$	$1,23 \pm 0,02$	$(23,8 \pm 0,6) \cdot 10^{-3}$	$1,51 \pm 0,05$

Tabella III Velocità al variare del raggio dei palloncini

Dalla formula (2) si può ricavare la velocità al quadrato in funzione della sezione frontale:

$$v^2 = \frac{2 \cdot F_{\text{viscosa}}}{C \cdot \rho_F} \cdot \frac{1}{S} \quad (5)$$

Come si evince dalla (5) tra v^2 ed S vi è una inversa proporzionalità e la costante di proporzionalità risulta pari a $\frac{2 \cdot F_{\text{viscosa}}}{C \cdot \rho_F}$.

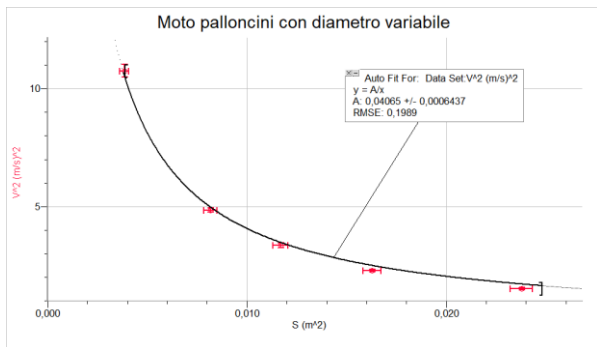


Figura 9 Andamento della velocità al quadrato in funzione della sezione frontale dei palloncini.

Il grafico di figura 9 conferma questo tipo di legame. Inoltre, come fatto nei casi precedenti, possiamo valutare il coefficiente di penetrazione sapendo che vale: $\frac{2 \cdot F_{viscosa}}{C \cdot \rho_F} = 0,04065$. Ossia

$$C = \frac{2 \cdot F_{viscosa}}{0,04065 \cdot \rho_F} = \frac{2 \cdot m \cdot g}{0,04065 \cdot 1,23} = \frac{0,022}{0,05} = 0,44$$

Anche in questo caso il risultato è plausibile. Il valore intermedio tra i due trovati in precedenza si può spiegare con quanto detto sopra relativamente alle diverse forme dei palloncini.

Elicotteri di carta in caduta

L'effetto dell'aria sul moto dei corpi è molto importante come abbiamo potuto verificare finora, ma è ancora più significativo se, per esempio, si pensa ad un aeroplano o ad un elicottero. Infatti, questi dispositivi non potrebbero volare intorno alla terra se non ci fosse l'atmosfera. Un esperimento interessante, riportato nell'articolo [3], riguarda il volo di elicotteri di carta. Nell'articolo viene studiato solo come varia la velocità limite al variare della lunghezza delle ali e al variare della massa degli elicotteri. Noi abbiamo effettuato uno studio più approfondito della dinamica di questo divertente oggetto.

Innanzitutto, vediamo come si costruisce un elicottero di carta. Si può creare facilmente utilizzando strisce rettangolari di carta da fotocopie, ad esempio, da 20,0 cm per 6,0 cm. Per farlo, si deve tracciare una linea al centro del rettangolo, per ottenere due rettangoli più piccoli da 10,0 cm per 6,0 cm. Successivamente, si suddivide uno dei rettangoli ottenuti in tre parti uguali da 10,0 cm per 2,0 cm ed uno in due parti uguali. Come mostrato in b) c) d) e) ed f) di figura 10 si ritagliano e piegano le varie parti ricavate. Per appesantire la coda si ripiega il lembo e si fissa con del nastro adesivo in modo da favorire così la caduta. La lunghezza e la larghezza alare possono variare a seconda del modello.

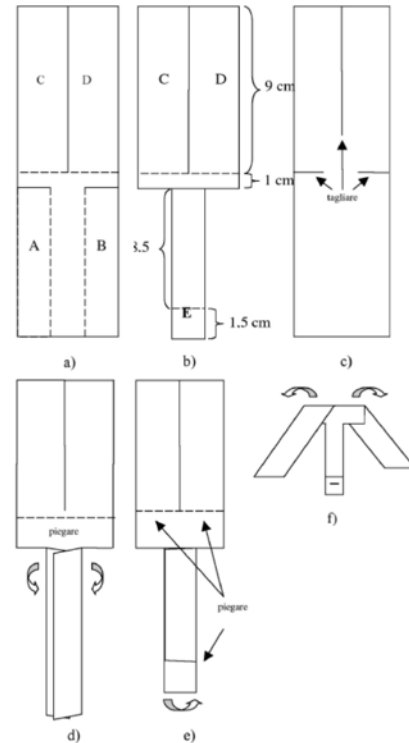


Figura 10 Come realizzare un elicottero di carta

L'elicottero così costruito se si lascia cadere si mette in rotazione e, dopo una breve fase di accelerazione, cade a velocità costante.

Prendendo spunto dall'articolo [3] abbiamo innanzitutto studiato il moto dell'elicottero di carta, in particolare ci siamo preoccupati di determinare la velocità limite, al variare della lunghezza delle ali. Anche in questo caso abbiamo proceduto come con i palloncini. Abbiamo eseguito un video per ogni "lancio" e con Tracker abbiamo determinato la legge oraria e quindi la velocità limite. Nel grafico di figura 12 riportiamo tutti i diagrammi orari relativi alle suddette misure. Ovviamente tutti gli elicotteri usati in questa misura hanno massa uguale ($m = (2,06 \pm 0,01)$ g) ottenuta zavorrando opportunamente i vari elicotteri.



Figura 11 Elicottero di carta in volo

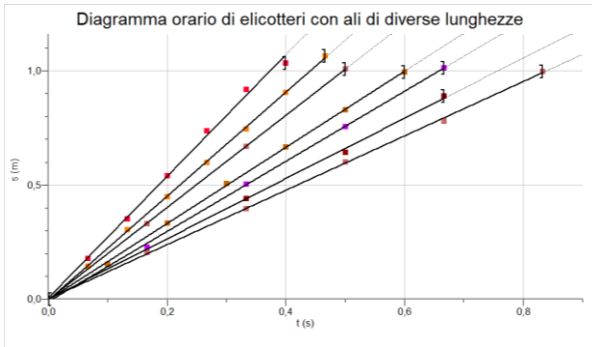


Figura 12 Diagrammi orari del moto degli elicotteri con ali di diversa lunghezza

In tabella IV sono riportate le velocità limite corrispondenti alle diverse lunghezze alari, mentre in figura 13 è riportato il corrispondente grafico.

V _{limite} (m/s)	L (m)
2,66±0,02	0,030±0,001
2,28±0,02	0,040±0,001
2,01±0,01	0,050±0,001
1,67±0,02	0,060±0,001
1,54±0,02	0,070±0,001
1,31±0,02	0,080±0,001
1,19±0,01	0,090±0,001

Tabella IV Velocità al variare della lunghezza alare

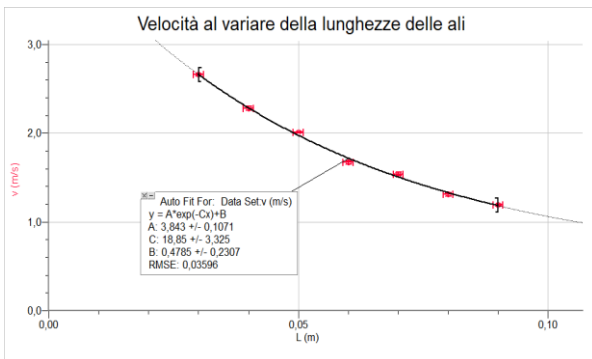


Figura 13 Velocità limite al variare della lunghezza delle ali.

Il risultato ottenuto è praticamente uguale a quanto descritto nell'articolo [3]. La velocità diminuisce all'aumentare della lunghezza delle ali secondo una relazione piuttosto complessa di tipo esponenziale.

A differenza da quanto fatto dall'autore dell'articolo di riferimento abbiamo voluto valutare se vi è una variazione della velocità al variare della larghezza delle ali. A tal proposito abbiamo variato la larghezza mantenendo costante la lunghezza delle ali (7 cm) e la massa ($m=2,60$ g) degli elicotteri. Le misure ottenute sono riportate in tabella V e nel grafico di figura 14.

V _{limite} (m/s)	L (m)
1,57±0,01	0,020±0,001
1,47±0,01	0,030±0,001
1,43±0,01	0,040±0,001
1,39±0,01	0,050±0,001
1,35±0,02	0,060±0,001

Tabella V Velocità al variare della larghezza alare

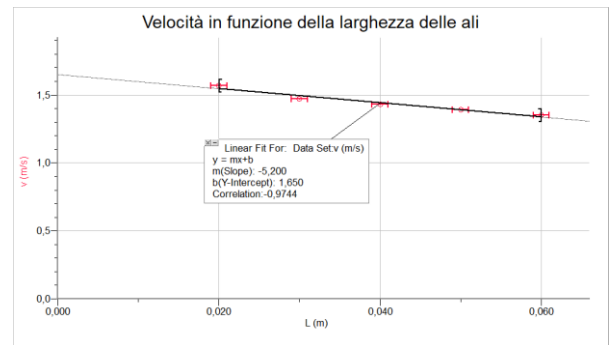


Figura 14 Andamento della velocità al variare della larghezza alare

Come si evince dal grafico la velocità diminuisce linearmente all'aumentare della larghezza delle ali. Però abbiamo escluso dal grafico velocità relative a larghezza inferiore a 2 cm in quanto, in tal caso, variavano repentinamente col variare della larghezza. Per esempio, la velocità ottenuta con larghezza di 1 cm era di quasi 5 m/s.

Un altro esperimento riportato nell'articolo [3] è quello della valutazione della velocità limite al variare della massa dell'elicottero lasciando invariate le dimensioni. Nel nostro caso abbiamo utilizzato un elicottero con lunghezza alare pari a 7 cm e larghezza pari a 3 cm. Le masse sono state variate aggiungendo delle piccole graffette metalliche nella parte bassa dell'elicottero. Le misure ottenute sono riportate in tabella VI e nel grafico di figura 15.

V _{limite} (m/s)	m (kg)
1,20±0,01	$(1,23±0,01) \cdot 10^{-3}$
1,33±0,01	$(1,64±0,01) \cdot 10^{-3}$
1,48±0,01	$(2,06±0,01) \cdot 10^{-3}$
1,76±0,02	$(2,78±0,02) \cdot 10^{-3}$
1,84±0,02	$(3,20±0,02) \cdot 10^{-3}$
2,03±0,02	$(3,90±0,02) \cdot 10^{-3}$

Tabella VI Velocità al variare della massa degli elicotteri

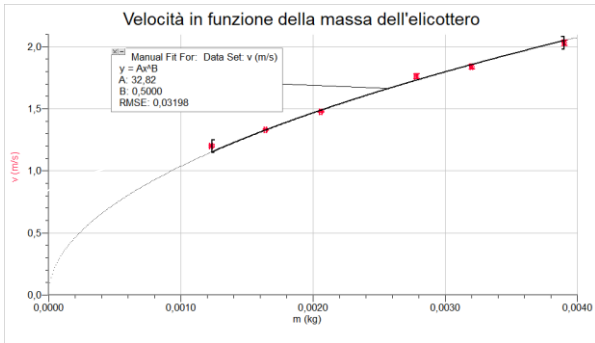


Figura 15 Velocità al variare della massa degli elicotteri

Il risultato ottenuto in questo esperimento è praticamente uguale a quello riportato nell'articolo [3], ma l'autore ha "fittato" i dati con una relazione di dipendenza lineare. A nostro avviso tale scelta non è corretta in quanto, banalmente, presuppone una velocità diversa da zero per una massa nulla. Invece a noi è sembrato chiaro che la relazione più adatta fosse una potenza con esponente 0,5. In effetti, tale modello sembra fittare bene i punti. A conferma di ciò riportiamo anche la *rettifica* del grafico di figura 15. Per rettificata si intende la procedura che permette di linearizzare il grafico. La nostra scelta risulta corretta, infatti, il grafico di figura 15 viene linearizzato graficando V^2 in funzione di m (vedi figura 16).

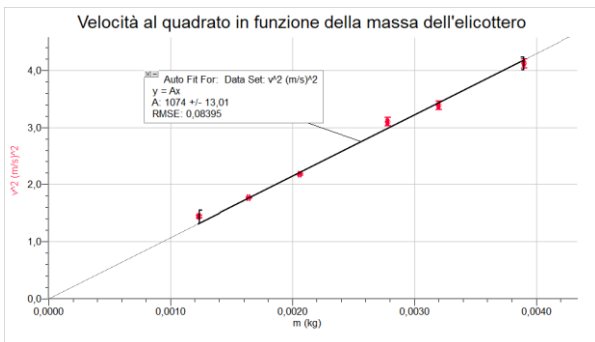


Figura 16 Rettifica dei dati graficati in figura 15

A questo punto abbiamo capito che probabilmente anche nel caso degli elicotteri di carta si può utilizzare, con una certa approssimazione, il modello usato per i palloncini. Certamente noi non abbiamo gli strumenti per descrivere la dinamica di questi oggetti che è molto complessa, ma semplificando al massimo, possiamo considerare quattro forze: la forza peso che fa cadere l'elicottero; la forza viscosa diretta verso l'alto e che dipende dalla velocità; una forza "laterale" che permette la rotazione e la forza di Archimede che in questo caso si può ritenere trascurabile. Anche in questo caso possiamo dire che la forza viscosa è pari alla forza peso quando il corpo raggiunge la velocità limite. Quindi elaborando i dati riportati in tabella VI abbiamo graficato la forza viscosa in funzione della velocità come fatto nella prima parte di questo lavoro. I dati ottenuti sono riportati in tabella VII e nel grafico di figura 17.

F _v (N)	V _{limite} (m/s)
0,0121±0,0001	1,20±0,01
0,0161±0,0001	1,33±0,01
0,0202±0,0001	1,48±0,01
0,0272±0,0001	1,76±0,02
0,0314±0,0001	1,84±0,02
0,0382±0,0001	2,03±0,02

Tabella VII Forza viscosa al variare della velocità limite

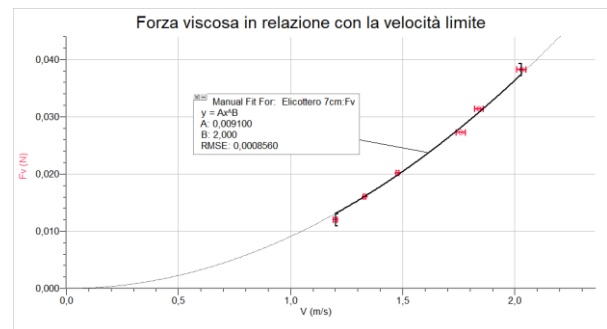


Figura 17 Andamento della forza viscosa in funzione della velocità limite nel caso di un elicottero di carta con lunghezza alare di 7 cm e larghezza 3 cm

Il modello che meglio approssima i dati sperimentali, come nel caso dei palloncini, è del tipo $F_v = k \cdot v^2$. La costante di proporzionalità è pari a $0,0091 \text{ kg/m}$. Se consideriamo valido il modello matematico (2), anche in questo caso, è possibile valutare il coefficiente di penetrabilità. In particolare, risulta:

$$\frac{1}{2} \cdot C \cdot \rho_F \cdot S = 0,0091$$

dove $S = \pi \cdot (0,07^2 + 0,03^2) = 0,018 \text{ m}^2$ rappresenta l'area "spazzata" dalle ali dell'elicottero (come raggio dell'area spazzata si è considerata la lunghezza della diagonale dell'ala).

In definitiva si ha:

$$C = \frac{2 \cdot 0,0091}{\rho_F \cdot S} = \frac{0,0182}{1,23 \cdot 0,018} = 0,82$$

Il risultato è plausibile visto che si vede ad occhio che la velocità limite degli elicotteri, a parità di massa, è più bassa rispetto a quella dei palloncini.

Un ultimo studio che abbiamo voluto effettuare è vedere come varia il parametro k , ottenuto nel grafico di figura 17, al variare della lunghezza delle ali dell'elicottero.

A tal proposito abbiamo realizzato i grafici della forza viscosa in funzione della velocità per diverse lunghezze alari e abbiamo determinato, per ognuno, la costante k che poi abbiamo messo in relazione con la superficie "spazzata" dai vari elicotteri. Questo è stato fatto per verificare se effettivamente la forza viscosa dipende linearmente da S come descritto dal modello (2). I dati ottenuti sono riportati in tabella VIII e il relativo grafico in figura 18.

L (m)	l (m)	S (m ²)	K (N·s/m)
0,030±0,001	0,030±0,001	0,0057±0,0002	0,0025±0,0004
	0,050±0,001	0,0107±0,0002	0,0047±0,0006
	0,070±0,001	0,0182±0,0001	0,0091±0,0009
	0,090±0,001	0,0283±0,0015	0,0140±0,0015

Tabella VIII Parametro K al variare dell'aria spazzata dalle ali dell'elicottero

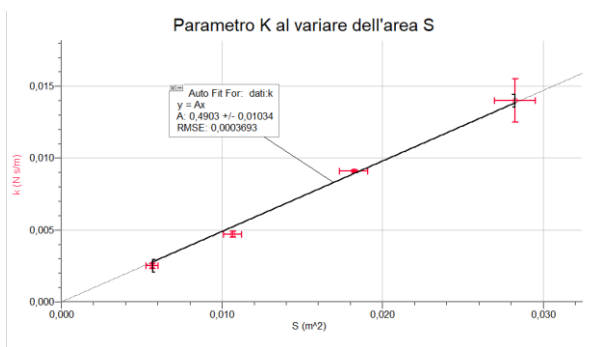


Figura 18 Variazione del parametro K al variare dell'area spazzata dalle ali dell'elicottero

Dal grafico si evince che la dipendenza del parametro K da S è una diretta proporzionalità come descritto dal modello (2). Questo conferma che l'ipotesi di utilizzare tale modello anche per gli elicotteri di carta può essere valida anche se non abbiamo trovato conferme in letteratura in questo senso.

Dalla pendenza del grafico è ancora possibile determinare il coefficiente di penetrabilità, infatti:

$$\text{pendenza} = \frac{1}{2} \cdot C \cdot \rho_F = 0,4903 \rightarrow C = 0,8$$

valore in accordo con quanto trovato precedentemente.

Conclusioni

L'aria è una miscela di sostanze aeriforme che avvolge la superficie terrestre ed è fondamentale per tantissimi aspetti. In particolare, consente la vita degli animali e delle piante. Noi, con questo lavoro, abbiamo voluto studiare come la presenza dell'aria influenzi il moto dei corpi. Abbiamo scoperto che quando un corpo si muove in aria nasce una forza di attrito che, a differenza dell'attrito radente da noi studiato in precedenza, dipende dalla velocità con cui il corpo si muove. Da quanto appreso dal nostro libro di fisica, questa forza, per oggetti sferici che si muovono a basse velocità, è espressa dalla legge di Stokes. Dal nostro studio però abbiamo capito che tale formula non entra in gioco facilmente. Infatti, anche prendendo in considerazione oggetti che si muovono a velocità inferiori ad un metro al

secondo (vedi Tab. II), velocità da noi ritenute "basse", la forza viscosa che si manifesta non è descritta dalla legge di Stokes, ma dalla legge (2). Il fatto di non aver ottenuto, attraverso le nostre esperienze, una forza viscosa direttamente proporzionale alla velocità, inizialmente ci ha creato dei problemi in quanto pensavamo che ci fosse qualcosa di sbagliato nei nostri esperimenti. In realtà, a conclusione di questo lavoro, possiamo dire che non vi è nulla di sbagliato nel nostro studio. Inoltre, pensiamo che nei libri di testo di fisica del liceo dovrebbero riportare anche la formula (2), visto che in condizioni "normali" trova una maggiore applicazione, e chiarire bene cosa si intende per "basse" velocità in questo tipo di fenomeno.

Vorremmo concludere questa relazione con una semplice riflessione. È incredibile quante informazioni si possano dedurre da un fenomeno apparentemente semplice, come quello studiato da noi, quando si guarda la realtà con gli occhi di uno "scienziato".

Bibliografia e sitografia

[1] U. Amaldi – L'Amaldi per i licei scientifici. blu

[2] https://www2.pd.infn.it/~scarlass/fisica1_ing/lucidi/nota_resistenza-aria.pdf

[3] L. Togliani – Elicotteri di carta. La Fisica nella Scuola, XLI, 1, 2008