

DE SPHAERIS CADENTIBUS IN CAPILLORUM DETERGENTEM

di Barbara Chierichetti *

*La possibilità, non scontata, di realizzare un progetto sperimentale nel corso di Fisica anche nel liceo classico è testimoniata da questa tesina (una prima dello stesso autore è pubblicata in Emmequadro n.40) presentata nel Convegno di ScienzaFirenze 2013 dal titolo **Ordine e Disordine nel mondo della Natura**. Lo studio del moto di caduta dei gravi in un liquido viscoso ha richiesto un percorso di apprendimento e di attività in laboratorio veramente esemplare, che potrebbe essere di ispirazione per analoghi progetti didattici. Il gruppo di lavoro era composto da studenti del terzo anno: Cristina Franco, Marina Franzoni, Alessandro Pisa, Giulio Preti, coordinati dal docente di Fisica.*

* Docente di Matematica e Fisica al Liceo Classico "G. Berchet" di Milano

L'esperimento da realizzare in laboratorio consisteva nello studio del moto di caduta di piccole sfere in un liquido viscoso, quale lo shampoo (sebbene tipicamente venga usata la glicerina). L'opportunità è stata immediatamente colta dal nostro gruppo che l'ha trovata di particolare interesse anche in considerazione del fatto che, parallelamente, durante le ore scolastiche, stava affrontando degli argomenti di matematica e fisica inerenti proprio ad aspetti teorici riguardanti l'esperimento.

Un altro fattore che certamente ha influenzato la nostra scelta è stato la completezza del fenomeno: esso, infatti, ci è sembrato didatticamente molto interessante non solo per gli aspetti teorici ma anche per gli aspetti sperimentali che avrebbe coinvolto.

In particolare i principali aspetti teorici che avremmo incontrato sarebbero stati: lo studio di un sistema meccanico e della forza d'attrito che agisce in esso; l'introduzione del concetto, a noi ancora ignoto, di viscosità; l'applicazione del principio di Archimede a un caso diverso da quello del galleggiamento statico; l'introduzione dei concetti di velocità limite e di regime; l'applicazione della teoria della propagazione delle incertezze sperimentali in un caso non banale.

Dal punto di vista sperimentale la cosa più interessante era la possibilità di poter applicare in prima persona quelle poche nozioni che fino ad allora avevamo studiato solo a livello teorico e quindi immedesimarci completamente nello scienziato che si appresta a fare un qualche esperimento e che, ancora ignaro dei risultati e di ciò che essi possono comportare, ne è ancora più incuriosito.

Gli aspetti principali di questo lavoro sperimentale erano i seguenti.

L'esecuzione di misure di spazio e tempo finalizzate alla determinazione della velocità del corpo in caduta.

L'esecuzione di misure di lunghezza mediante calibro o micrometro centesimale.

La costruzione di istogrammi e grafici per interpolare i dati ottenuti e ricavarne una interpretazione scientifica.

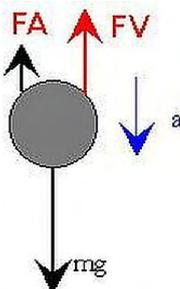
Non secondaria, inoltre, ai fini della riuscita dell'esperimento è stata la sua possibilità di essere ripetuto più volte e con costi poco elevati in laboratorio. Il materiale utilizzato, infatti, è facilmente reperibile e poco costoso.

Nel seguente lavoro, dunque, esponiamo punto per punto il percorso compiuto dal nostro gruppo durante il corso di questo progetto, a partire dai meri aspetti teorici, fino ad arrivare all'analisi di casi complessi e a una conclusione.



Principi Teorici

In generale una sferetta che cade immersa in un fluido è soggetta all'azione di tre forze: *Forza di gravità* (forza peso), $F_p = mg$, diretta verticalmente e orientata verso il basso; *Spinta di Archimede* (spinta idrostatica), diretta verticalmente e orientata verso l'alto; *Attrito del fluido* (viscosità), diretto verticalmente, orientato verso l'alto, e dipendente in generale dalla forma del corpo, dalla viscosità η e dalla densità d del liquido nonché dalla velocità v del corpo.



La forza peso è costante e si può trovare moltiplicando la massa della sferetta per l'accelerazione di gravità che si può considerare uguale a $9,81 \text{ m/s}^2$. Dato che la densità è il rapporto fra massa e volume $d_s = m/V$, (d_s densità sferetta) si può trovare la massa moltiplicando la densità per il volume ($m = d_s \cdot V$). Tenendo conto della formula per il volume della sfera si ha:

$$m = \frac{4}{3} \pi r^3 d_s$$

Moltiplicando questa massa per g (accelerazione di gravità) si ottiene la forza peso:

$$F_p = \frac{4}{3} \pi r^3 d_s g$$

Per quanto riguarda la spinta di Archimede, invece, sappiamo che un corpo immerso in un fluido riceve una spinta verso l'alto pari al peso del volume del liquido spostato. In pratica il volume della sferetta deve essere moltiplicato per la densità d del liquido dove essa si muove ottenendo così la massa del liquido «spostato». Per ricavare la forza peso della massa contenuta in questo volume di liquido ovvero la spinta di Archimede, occorre moltiplicare per g :

$$F_A = \frac{4}{3} \pi r^3 d g$$

Per calcolare la forza di attrito del mezzo, detto attrito viscoso, che si oppone alla caduta, si può fare ricorso alla legge di Stokes:

$$F_V = 6\pi\eta r v$$

dove η è la costante caratteristica del liquido che si chiama viscosità, r il raggio della sferetta e v la sua velocità.

All'inizio del moto della sferetta, la forza peso prevale sulla somma della spinta di Archimede e della forza d'attrito e il moto avviene in modo accelerato. Aumentando però la velocità, aumenta anche la forza di attrito finché la risultante delle tre forze sarà nulla. Da quel momento in poi la sferetta raggiunge una velocità limite che rimarrà costante dato che l'accelerazione è nulla.

Nell'esperimento che descriveremo nel seguito, abbiamo fatto cadere delle sferette

di metallo di diametro massimo 4 mm nello shampoo, un liquido molto viscoso, e ne abbiamo analizzata e osservata la seconda fase del moto, quella di regime. Questa fase è caratterizzata dalla relazione:

$$F_P - F_A - F_V = 0$$

A questo punto sostituendo tutti i termini del primo membro con le formule presentate in precedenza, otteniamo:

$$\frac{4}{3}\pi r^3 d_s g - \frac{4}{3}\pi r^3 d g - 6\pi r v = 0$$

Da questa, con semplici passaggi, si giunge alla relazione:

$$V_l = \frac{2(d_s - d)g}{9\eta} r^2$$

la quale mette in evidenza l'interessante dipendenza quadratica tra la velocità limite della sferetta e il suo raggio. Ci siamo valse in particolare di questa dipendenza per scegliere la sferetta più adatta all'esperimento, considerando che la velocità limite che essa avrebbe raggiunto sarebbe aumentata col quadrato del suo raggio.

Descrizione dell'apparato sperimentale

Per lo svolgimento di tutta la nostra sperimentazione abbiamo utilizzato gli strumenti più idonei che siamo riusciti a reperire. Di seguito sono nominati e descritti nello specifico.

Sferette di metallo

Abbiamo richiesto a un ferramenta un buon numero di sferette con un diametro di 4 mm. Questa dimensione è stata scelta perché è sufficientemente piccola da rendere la velocità di regime tale da poter studiare i tempi di caduta della sferetta nel liquido viscoso e sufficientemente grande da poter essere maneggiata. Per verificare la loro forma e dimensione, ci siamo dotati di un calibro con una precisione del ventesimo di millimetro.

In ogni misurazione del diametro della stessa sferetta, abbiamo proceduto con un metodo particolare; non ci siamo infatti limitati a misurarlo una sola volta, ma abbiamo rigirato la sferetta su se stessa e ripetuto la misura, assicurandoci in tal modo non soltanto di ottenere la misura del diametro, ma di verificare che la forma fosse effettivamente sferica.

I risultati ottenuti sono stati rielaborati e riportati di seguito:

Diametri	Percentuale di sferette
4,00 mm	69%
4,10 mm	18%
4,05 mm	13%

Terminate le misurazioni è risultato che le sferette erano tutte effettivamente tali (sferiche), ma che i diametri erano leggermente differenti. Calcolando il valore medio dei diametri e considerando come incertezza la semidispersione delle misure, abbiamo ottenuto il seguente risultato $r = (4,02 \pm 0,05) \text{ mm}$ (valore medio approssimato con un numero di cifre dopo la virgola pari a quelle presenti nell'incertezza).

Cilindro graduato

Il fenomeno fisico che abbiamo deciso di riprodurre sperimentalmente, com'è stato mostrato nel paragrafo iniziale riguardante i principi teorici, è stato precedentemente studiato e analizzato dal fisico irlandese George Stokes.

Tuttavia la teoria che elaborò e dimostrò presupponeva che il corpo si muovesse in un mezzo di estensione infinita, perché altrimenti le onde prodotte dal moto della sferetta nel liquido viscoso, una volta rimbalzate contro le pareti e tornate al corpo in caduta, avrebbero alterato la sua velocità. Ovviamente noi non possediamo i mezzi per ovviare a questo fenomeno ma nonostante ciò abbiamo cercato il cilindro più alto e largo che riuscivamo a trovare. Quello che abbiamo recuperato, oltre a presentare un'altezza di 43 cm era dotato di un diametro di 6 cm, dimensioni sufficienti sia per minimizzare l'effetto - parete e l'effetto - fondo¹ sia per avere il tempo necessario di analizzare la sferetta.

Cronometro

I tempi di caduta delle sferette nel liquido viscoso sono stati registrati grazie a dei cronometri i quali tuttavia potevano essere azionati e fermati solo per via manuale. Durante le misurazioni abbiamo adottato tre diversi apparecchi elettronici. Il primo è stato il cronometro di un cellulare che permetteva di registrare i tempi parziali con una precisione del centesimo di secondo; il secondo quello di un cellulare con precisione millesimale, anche se abbiamo deciso di impostarlo con una precisione centesimale perché abbiamo convenuto che essendo regolato manualmente avesse poco senso tenere conto dei millesimi di secondo; per ultimo abbiamo utilizzato un cronometro elettronico in dotazione alla scuola sempre di precisione millesimale, al quale, per la stessa ragione, abbiamo impostato la modalità centesimale. Solo in un'occasione siamo ricorsi all'impiego dei millesimi di secondo, ma lo abbiamo fatto per esaltare l'incidenza dell'errore casuale.

Operazioni preparatorie dell'esperimento

Per prima cosa si procedeva con il travasamento di 1 dm³ di shampoo all'interno del cilindro, cercando di ottenere il minor numero possibile di bolle d'aria intrappolate nel liquido, affinché queste successivamente non interferissero con il moto della sferetta.

A tale scopo, quando possibile, lo abbiamo versato con un giorno di anticipo così che il giorno seguente, l'aria intrappolata nel liquido, sarebbe già salita in superficie e dispersa nell'ambiente.

Prima di essere fatte cadere nel liquido le sfere venivano adeguatamente pulite con l'alcol, poi con delle pinzette, si facevano avvicinare il più possibile alla superficie dello shampoo (in modo tale da impedire un'accelerazione del corpo data dalla caduta in aria della sferetta) e quindi erano lasciate cadere nel mezzo del cilindro così da ridurre al minimo l'effetto-parete delle onde prodotte da queste. Per riuscire a misurare gli intervalli di tempo trascorsi in spazi predefiniti, abbiamo dovuto misurare e disegnare sulla superficie di vetro del cilindro delle tacchette graduate con una riga millimetrata.

Studio del moto di una sferetta in un liquido viscoso

Questa misura è stata eseguita per verificare se e quando la sferetta in moto in un liquido viscoso, che inizialmente è soggetta a una fase di moto accelerato, assume una velocità di regime.

Per questo tipo di verifica ci siamo muniti del cronometro con la modalità di tempi parziali e del cilindro descritto in precedenza. La zona presa in considerazione per le misurazioni comprendeva l'intero spazio occupato dal liquido. Quest'ultimo, inoltre, è stato suddiviso in nove intervalli evidenziati da tacchette colorate, disegnate direttamente sulla superficie del cilindro tramite un evidenziatore e distanti 3,5 cm l'uno dall'altra, utilizzando una riga millimetrata. Procedendo con l'esperimento abbiamo riportato su una tabella spazio-tempo tutte le misurazioni fatte. Confrontandole, poi, tra di loro, sono state scelte le ultime quattro tra le sette serie di misurazioni che ci sembravano più significative ai fini



dell'esperimento: mentre, infatti, le prime misurazioni presentavano profonde incongruenze reciproche causate dalla nostra iniziale inesperienza e disattenzione nel maneggiare gli strumenti, quelle successive, eseguite prestando particolare attenzione a tutti i vari fattori che sapevamo avevano contribuito alla cattiva riuscita delle misurazioni precedenti (per esempio bolle d'aria rimaste nel liquido o il non corretto punto di rilascio delle sferette), sono risultate migliori.

Qui di seguito riportiamo i risultati delle suddette misurazioni unite alla misura della velocità della sferetta in ogni tratto, calcolata mediante la formula $v = \Delta s / \Delta t$. Questa ulteriore misura ci è servita per verificare se in ogni intervallo la velocità fosse la medesima.

	s (cm)	t ₁ (s)	t ₂ (s)	t ₃ (s)	t ₄ (s)	t _m (s)	$v_m = \frac{\Delta s}{\Delta t}$ (cm/s)
1	3,5	3,33	2,61	3,15	2,97	3,02	
							$(s_2 - s_1) / (t_2 - t_1) = 0,96$
2	7,0	6,93	6,48	6,70	6,57	6,67	
							$(s_3 - s_2) / (t_3 - t_2) = 1,03$
3	10,5	10,53	9,76	9,94	9,99	10,06	
							$(s_4 - s_3) / (t_4 - t_3) = 1,06$
4	14,0	13,72	13,00	13,45	13,23	13,35	
							$(s_5 - s_4) / (t_5 - t_4) = 1,00$
5	17,5	17,19	16,69	16,83	16,65	16,84	
							$(s_6 - s_5) / (t_6 - t_5) = 1,05$
6	21,0	20,70	19,71	20,11	20,16	20,17	
							$(s_7 - s_6) / (t_7 - t_6) = 1,04$
7	24,5	24,07	23,08	23,44	23,53	23,53	
							$(s_8 - s_7) / (t_8 - t_7) = 1,05$
8	28,0	27,40	26,59	26,73	26,77	26,87	
							$(s_9 - s_8) / (t_9 - t_8) = 1,04$
9	31,5	30,69	29,74	30,33	30,19	30,24	

In seguito per stabilire il numero di cifre significative dopo la virgola abbiamo calcolato l'incertezza con la legge di propagazione degli errori.

$$\varepsilon(v) = v \left[\frac{\varepsilon(\Delta s)}{\Delta s} + \frac{\varepsilon(\Delta t)}{\Delta t} \right]$$

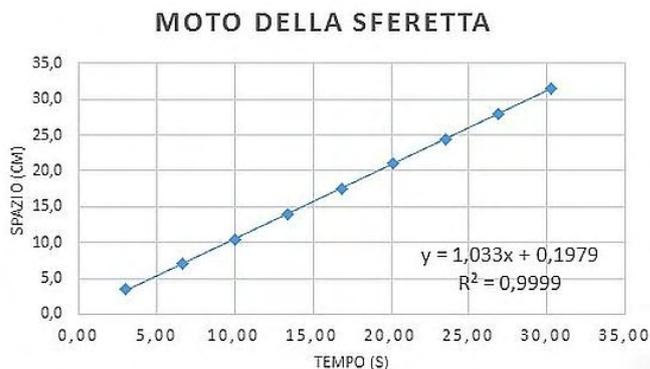
Dove v corrisponde al valor medio ottenuto per ciascun tratto; Δs corrisponde all'ampiezza di ogni tratto cioè 3,5 cm; Δt corrisponde alla differenza ($t_{mj} - t_{mi}$) calcolata per i vari tratti. Per l'errore sulle distanze abbiamo scelto la sensibilità della riga con cui abbiamo fissato le tacchette sul vetro: 0,1 cm, quindi $\varepsilon(\Delta s) = 0,2$ cm; per l'errore sui tempi, $\varepsilon(\Delta t)$, abbiamo applicato la legge di propagazione degli errori per la differenza di due misure, alle semidispersioni calcolate sulle quattro serie per i vari tratti.

Le misure finali per ciascun tratto sono riportate nella tabella qui a fianco.

tratto	Velocità (cm/s)
1-2	$1,0 \pm 0,1$
2-3	$1,0 \pm 0,1$
3-4	$1,1 \pm 0,2$
4-5	$1,0 \pm 0,2$
5-6	$1,1 \pm 0,1$
6-7	$1,0 \pm 0,1$
7-8	$1,0 \pm 0,2$
8-9	$1,0 \pm 0,2$

Come si evince dalla tabella le velocità medie nei vari tratti mantengono lo stesso valore. Pertanto possiamo ritenere che il moto sia uniforme fin dall'inizio e che la sferetta avanzi, quindi di spazi uguali in tempi uguali.

Questo risultato è stato confermato dal grafico spazio-tempo qui riportato, ottenuto ponendo in ascissa i valori medi dei tempi e in ordinata le posizioni corrispondenti. La retta ottenuta interpolando i dati al computer, si sovrappone molto bene ai dati sperimentali, inoltre il valore del suo coefficiente angolare che corrisponde al valore della velocità comprova i risultati ottenuti.



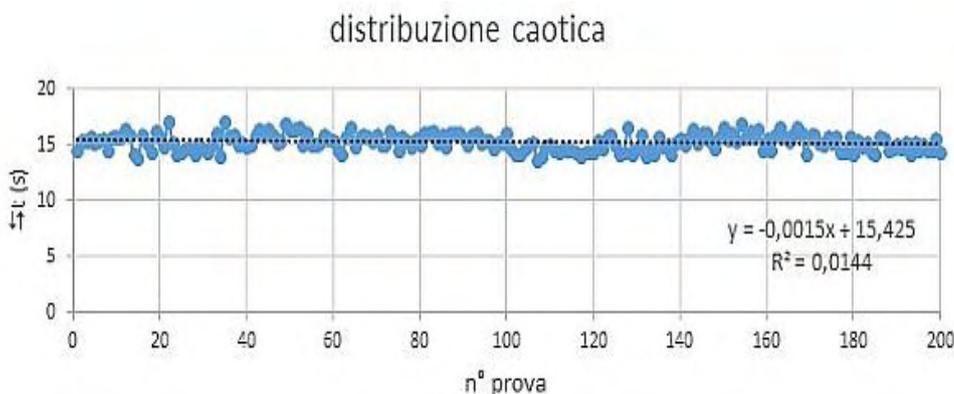
Misura del tempo di caduta di 200 sferette

Dopo aver verificato che il moto considerato è un moto rettilineo uniforme siamo passati allo studio della misura del tempo di caduta vera e propria.

Abbiamo quindi predisposto l'apparato sperimentale descritto in precedenza (cilindro graduato, sferette d'acciaio, cronometro) e misurato il tempo di caduta, Δt , di 200 sferette d'acciaio e la temperatura del liquido corrispondente, misurata mediante una termocoppia che pescava in esso.

Inizialmente abbiamo fissato come punto di partenza per le registrazioni una tacchetta a 12,25 cm dal punto di ingresso della sferetta nel liquido viscoso, ma successivamente, riflettendo sulle interferenze che le sferette presenti sul fondo avrebbero potuto esercitare, abbiamo deciso di innalzare tale traguardo a 10,5 cm e di fissare il secondo a 12,25 cm dal fondo in modo tale da ridurre l'effetto delle interferenze sopra citate e considerare una porzione di liquido «centrale» che quindi avesse delle condizioni più omogenee (come la temperatura).

Inizialmente abbiamo riportato le misure su una tabella, poi per analizzare meglio i dati abbiamo costruito un grafico dove abbiamo posto in ascissa il numero della prova e in ordinata il tempo impiegato dalla sferetta per percorrere il tratto considerato.



È interessante notare che il coefficiente angolare della retta di interpolazione dei dati è leggermente negativo, questo ci ha indotto a pensare che all'aumentare della temperatura diminuiscono i tempi di caduta.

Di seguito è riportato l'istogramma relativo alla distribuzione dei tempi di caduta delle 200 sferette. Per determinare il numero di bande di frequenza con cui costruire il grafico abbiamo utilizzato la seguente formula: $K=1+3,322 \lg N$ dove K è il numero di bande di frequenza e N il numero di prove; il risultato è 8,6. Quindi abbiamo utilizzato otto bande di frequenza.

n°	val. min.	val. mag.	F
1	13,727	14,159	12
2	14,159	14,590	34
3	14,590	15,022	26
4	15,022	15,454	46
5	15,454	15,885	39
6	15,885	16,317	26
7	16,317	16,748	13
8	16,748	17,180	4



Come si può vedere, nonostante il grande numero di misurazioni, non siamo riusciti ad ottenere una distribuzione di frequenza simmetrica che descrivesse l'errore casuale e quindi ci siamo domandati quali fattori avessero viziato la nostra misura.

Dopo aver preso in considerazione diverse ipotesi ci siamo trovati d'accordo nel constatare che i fattori più incisivi che avevano contribuito all'alterazione della simmetria erano due.

Il primo era dovuto alla formazione occasionale di bolle nello shampoo, causate dalla caduta delle sferette stesse, che tendevano a creare una sorta di «scia» che influenzava la misura del tempo di caduta dei lanci successivi. Questa però era riscontrabile solo dopo un discreto numero di misurazioni.

Il secondo era causato dalla variazione della temperatura che in qualche modo poteva modificare la viscosità dello shampoo e quindi la velocità di caduta delle sferette.

Abbiamo ovviato al primo fattore predisponendo il giorno precedente quello dell'esperimento due cilindri graduati nelle stesse condizioni, così dopo 100 misurazioni abbiamo estratto le sferette dal primo cilindro tramite un colino e poi abbiamo proseguito l'esperimento servendoci dello shampoo non modificato dalle scie delle sferette, ma probabilmente nonostante i nostri accorgimenti le scie hanno ugualmente influenzato il nostro esperimento.

Per analizzare meglio l'influenza della temperatura sui dati ottenuti, invece, abbiamo deciso di dividere le nostre 200 misure in due gruppi, nel primo gruppo abbiamo considerato le misure dove la temperatura variava tra 17,2°C e 17,7°C, nel secondo invece le misure dove la temperatura variava tra 17,7°C e 18,2°C. Nel primo grafico (corrispondente alle prime cinquanta misure) la disposizione è quasi simmetrica, nel secondo grafico (intervallo 17,7°C-18,2°C) il dato relativo all'intervallo tra 14,134 s e 14,541 s rappresenta un picco di valori: questa disposizione ci porta a ritenere che le «scie» citate in precedenza abbiano abbassato il valore dei tempi ma solo nelle misure successive alla cinquantesima.

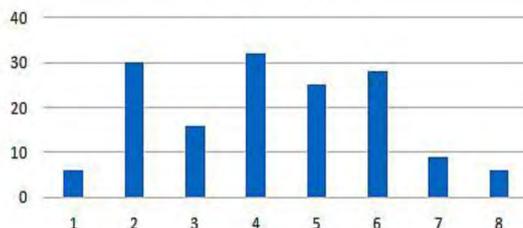
Questa tuttavia non è l'unica conclusione a cui siamo giunti: il tempo medio di caduta delle prime 50 sferette è 15,316 s, che è maggiore rispetto a quello delle ultime 150 misure che vale 15,249s, questo fatto ci porta a ritenere che all'aumentare della temperatura la velocità di caduta delle sferette aumenta. Per comprendere meglio questo aspetto abbiamo deciso di studiare a fondo la relazione tra la temperatura e il tempo di caduta delle sferette.

n°	val. min. (s)	val. mag. (s)	F
1	13,876	14,289	6
2	14,289	14,702	4
3	14,702	15,115	9
4	15,115	15,528	10
5	15,528	15,941	11
6	15,941	16,354	4
7	16,354	16,767	2
8	16,767	17,180	2



n°	val. min. (s)	val. mag. (s)	F
1	13,727	14,134	6
2	14,134	14,541	30
3	14,541	14,948	16
4	14,948	15,355	32
5	15,355	15,762	25
6	15,762	16,169	28
7	16,169	16,576	9
8	16,576	16,983	6

distribuzione di frequenza
 $17,7^{\circ}\text{C} < t < 18,2^{\circ}\text{C}$



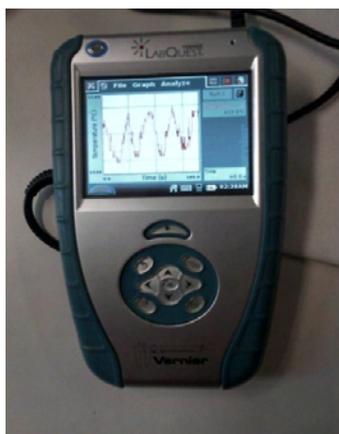
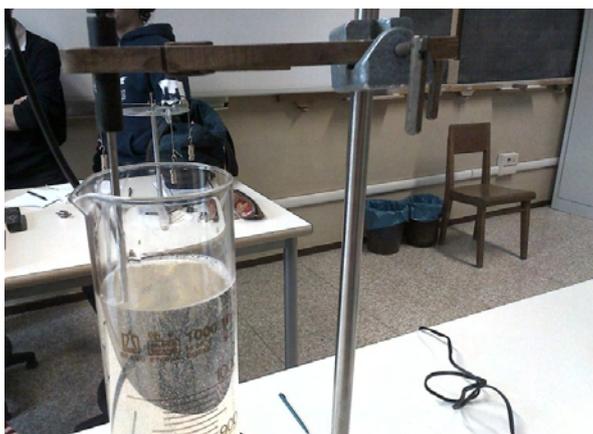
Nuove verifiche sperimentali per la rielaborazione dei dati

Inizialmente abbiamo osservato e misurato la caduta delle sferette nel liquido viscoso senza tuttavia prestare particolare attenzione a fattori potenzialmente incisivi sull'esito delle misurazioni. Quando abbiamo riscontrato alcune irregolarità, nella stesura e nella rielaborazione dei dati raccolti, abbiamo formulato diverse ipotesi riguardo le loro possibili cause e abbiamo ripetuto le misure ponendo attenzione a quei fattori che potevano alterare le condizioni in cui veniva eseguito l'esperimento, come per esempio la posizione da cui veniva rilasciata la sferetta o la temperatura del liquido viscoso.

La verifica sperimentale riguardante la diversa posizione di rilascio delle sferette ha dimostrato che le sferette che si muovono nel centro del cilindro cadono leggermente più veloci rispetto a quelle che si muovono vicino alla parete del cilindro. Tuttavia applicando il fattore di correzione per i bordi e per il fondo ai dati è risultato evidente che questa piccola differenza non spiegava le discrepanze riscontrate nel grafico. Inoltre grazie all'impiego della termocoppia abbiamo osservato che la temperatura del liquido, varia a seconda che la si misuri vicino alle pareti (dove è più fredda) piuttosto che nel mezzo (dove è più calda) e quindi si è ipotizzato che anche in questo caso il fattore più incisivo fosse la temperatura. Messa da parte la prima ipotesi, abbiamo verificato la seconda.

Misurazioni al variare della temperatura

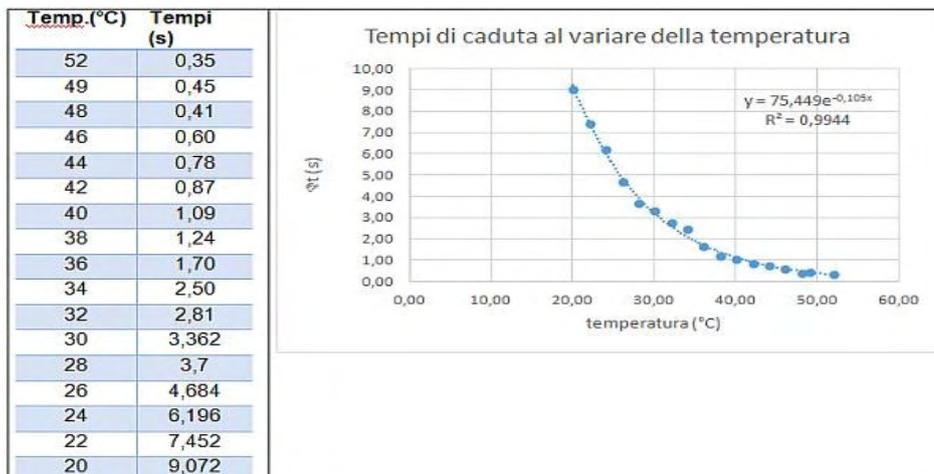
Abbiamo deciso di approfondire il tema dell'influenza della temperatura sul tempo di caduta delle sferette.



Si è quindi riscaldato il liquido per mezzo di una piastra elettrica tenendolo a 50°C a bagnomaria per un'ora. Quindi abbiamo travasato lo shampoo all'interno del cilindro graduato prendendo come estremi due punti a 12 cm di distanza tra loro e abbiamo proceduto con le misurazioni monitorando la temperatura tramite una termocoppia inserita all'interno del liquido. Partendo da una temperatura di 52°C abbiamo preso cinque misure per ogni grado pari fino ad arrivare a 20°C , in modo da verificare se effettivamente al variare della temperatura variasse anche il tempo di caduta. Man mano che la temperatura del liquido tendeva a uniformarsi con quella dell'ambiente esterno, raffreddandosi, i tempi di caduta aumentavano visibilmente. Se infatti a 52°C

la sferetta impiegava solo 0,35 secondi circa a percorrere lo spazio considerato, già a 30°C ce ne metteva quasi 4, mentre a 20°C arrivava a impiegarne ben 9!

Qui di seguito riportiamo una tabella con, a sinistra, i valori della temperatura misurati dalla termocoppia, e a destra la media matematica dei cinque tempi misurati per ogni grado. Per quanto concerne il valore della temperatura, abbiamo motivo di credere che essa all'interno del cilindro fosse in realtà leggermente più alta di quella misurata in superficie dalla termocoppia, di conseguenza di tanto in tanto scuotevamo il cilindro oppure mescolavamo il liquido di modo da uniformarne la temperatura interna. Dopo aver dimostrato che effettivamente al variare della temperatura varia anche l'intervallo di tempo in cui la sferetta percorre un determinato spazio, e più precisamente tanto maggiore è la temperatura, tanto minore è il tempo di caduta e viceversa, abbiamo deciso di rappresentare la relazione fra queste due grandezze mediante il seguente grafico tempo-temperatura.



Come si vede, le medie dei dati inserite seguono un andamento piuttosto regolare che noi abbiamo evidenziato mediante una curva che li interpolasse. Questa esprime una funzione che mostra una dipendenza di tipo esponenziale tra la temperatura e il tempo di caduta delle sferette.

Conclusioni

Riassumendo tutto il percorso svolto fino ad ora, le tappe fondamentali del nostro lavoro sono state lo svolgimento di varie misure nel tratto del liquido in cui la sferetta presentava una velocità costante e il calcolo della sua velocità media unito all'analisi più approfondita di eventuali fattori di influenza che non dipendevano solo dal nostro errore sperimentale (come la temperatura).

A questo punto partendo dai risultati grezzi li abbiamo analizzati attraverso la costruzione di grafici e tabelle al fine di poterne dare una interpretazione.

Contrariamente a quello che ci aspettavamo, però, non tutti i grafici presentavano un andamento regolare.

Inizialmente abbiamo pensato a un nostro errore nelle misurazioni o ad una eccessiva superficialità nello svolgimento dell'esperimento.

Abbiamo dunque agito di conseguenza: a mano a mano che lavoravamo al progetto, abbiamo radicalmente cambiato l'approccio nei confronti del lavoro sperimentale. Se infatti inizialmente svolgevamo le misurazioni con disinvoltura e poca attenzione verso le leggere differenze che si manifestavano durante lo svolgimento dell'esperimento, nel momento in cui abbiamo interpretato i dati raccolti e ci siamo domandati il motivo per il quale il medesimo fenomeno si riproducesse in maniere leggermente differenti, abbiamo convenuto che fosse necessario ripetere molte misurazioni con più precisione. Ripetendole, abbiamo applicato tecniche sempre nuove e migliori per riprodurre il fenomeno al meglio, e ci siamo accorti di come sia necessaria attenzione anche per i più piccoli dettagli, perché, come ci è risultato evidente, la regolarità dei dati è strettamente legata alla regolarità delle condizioni in cui viene svolto l'esperimento.

Perché allora continuavamo a ottenere risultati non del tutto regolari nei grafici?

Per rispondere a questa domanda siamo partiti dal titolo stesso di questo progetto: *Ordine e Disordine nel mondo della natura*. Di fatto, noi siamo riusciti a ottenere, a partire da una serie caotica e inorganica di dati, numerosi grafici che presentavano, seppur diversi tra di loro, degli andamenti regolari (come si può notare nel capitolo riguardante le misure relative a 200 sferette).

Infatti, come si afferma nell'antica mitologia greca, Ordine e Disordine (*Cosmos e Chaos*) hanno una parentela etimologica: il primo, cioè l'ordine razionale del mondo, nasce sempre da uno sfondo caotico. Quello che abbiamo avuto modo di provare, dunque, è che di fatto i due livelli coesistono. Secondo la teoria degli errori la distribuzione delle misure tende a essere simmetrica quando si esegue un numero elevato di misure, tuttavia ci siamo resi conto che durante l'esecuzione di queste avvengono significative variazioni delle condizioni fisiche del sistema. Questo è quello che ci sembra abbia impedito di ottenere quel tipo di distribuzione.

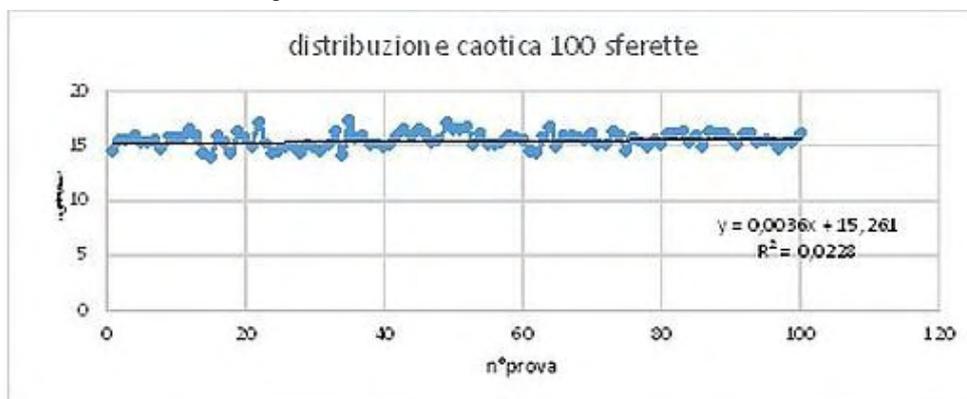
Considerazioni a posteriori del docente

Nella tesina presentata al concorso, per ragioni di tempo e di energie, resta un problema aperto in quanto non si è riusciti a chiarire le ragioni dell'asimmetria presentata dall'istogramma della distribuzione dei tempi di caduta delle sferette nello shampoo.

Riguardando questo lavoro ho riflettuto sul ruolo della temperatura e sull'efficacia della rappresentazione dei grafici.

Per quanto riguarda la temperatura, già al momento dell'esperimento avevo provato a usare la curva della dipendenza *tempi di caduta-temperatura* come fattore di correzione per la distribuzione e avevo notato che, anche in questo caso, l'istogramma non presentava la simmetria sperata. Questo mi aveva portato a ritenere che la variazione della temperatura avrebbe potuto essere un fattore che influenzava le misure, ma che non poteva essere la causa dell'asimmetria. Inoltre, da una analisi più attenta dei dati raccolti, mi sono accorta che, nonostante la temperatura continui ad aumentare durante lo svolgimento dell'esperimento, cambiando il gruppo di misure il coefficiente angolare della retta che le interpola, non ha sempre coefficiente angolare negativo.

Per esempio prendendo in esame le prime 100 misure, come mostra il seguente grafico, il coefficiente angolare vale 0,0036 s.



Questo conferma che la variazione della temperatura non ha un ruolo rilevante nelle misure svolte e che l'inclinazione della retta presa in esame dipende da fluttuazioni statistiche.

Un altro aspetto che ho ripreso in considerazione riguarda l'interpretazione della distribuzione delle frequenze. A tal fine ho costruito per diversi gruppi di misure degli istogrammi riducendo il numero di bande di frequenza da 8 a 5, in modo da ottenere dei grafici più compatti.

Indipendentemente dal gruppo scelto, in modo più o meno accentuato, gli istogrammi continuano a mostrare l'asimmetria, come si può notare nel grafico alla pagina seguente.

Il fatto che questa caratteristica sia presente per tutto lo svolgimento dell'esperimento mi ha fatto pensare alla presenza di un errore sistematico dovuto a un errore compiuto durante l'esecuzione dell'esperimento da parte degli studenti.

Probabilmente, visto il grande numero di sferette da lanciare durante un pomeriggio,

gli studenti non aspettavano un tempo sufficientemente lungo tra un lancio e l'altro, impedendo così che si ristabilissero le condizioni iniziali. Questo può aver permesso a qualche sferetta di muoversi più velocemente di quello che avrebbe dovuto, infatti alcuni di loro parlavano di scie all'interno del fluido che non dovrebbero esserci.

In questo lavoro abbiamo inseguito per molto tempo un falso indizio, la temperatura, e questo ci ha sviato e ha impedito di prestare maggiore attenzione affinché nella esecuzione della serie di misure si presentassero le stesse condizioni.

Barbara Chierichetti

(Docente di Matematica e Fisica al Liceo Classico "G. Berchet" di Milano)

n°	val. min. (s)	val. mag. (s)	F
1°	13,727	14,4176	32
2°	14,4176	15,1082	53
3°	15,1082	15,7988	61
4°	15,7988	16,4894	43
5°	16,4894	17,18	11



Note

¹ Gli effetti citati sono stati ampiamente descritti e analizzati da Vittorio Lucio Callegaro e Paolantonio Marazzini nell'articolo *Correzioni alla legge di Stokes per la misura della viscosità di un liquido* nella rivista "La fisica nella Scuola", pp.17-26, N. XXXIX, 1, 2006.

Indicazioni bibliografiche

P. Marazzini, M.E. Bergamaschini, L. Mazzoni. *Fisica. Ipotesi teorie esperimenti*, Minerva Scuola, Milano 2012.

U. Amaldi. *Le traiettorie della fisica*, Zanichelli, Bologna 2012.

P. Marazzini, V.L. Callegaro. "La fisica nella scuola". N. XXXIX, 1, 2006.