

Date appelli sessione estiva

Scritto	8 giugno 2022, ore 9:30	(Aula Magna, Irnerio 46)
Orale	14 giugno 2022, ore 9:30	(Laboratorio, Berti-Pichat 6/2)
Scritto	23 giugno 2022, ore 9:30	(Aula Magna, Irnerio 46)
Orale	28 giugno 2022, ore 9:30	(Laboratorio, Berti-Pichat 6/2)
Scritto	12 luglio 2022, ore 14:00	(Aula Magna, Irnerio 46)
Orale	19 luglio 2022, ore 9:30	(Laboratorio, Berti-Pichat 6/2)

Lezione di lunedì 2 Maggio → rilevazione opinioni studenti

Esperimento finale

Cinque esperimenti diversi:

- Misura di calore specifico due postazioni
- Misura di coefficienti di attrito due postazioni
- Misura di coefficiente di viscosità due postazioni
- Misura della costante G una postazione
- Misura di conteggio di fotoni una postazione

Gruppi di tre studenti per ogni postazione (ogni gruppo, quindi ogni studente, farà un solo esperimento)

Turno A	6 Maggio
Turno B	11 Maggio
Turno C	12 Maggio
Turno D	13 Maggio
Turno E	18 Maggio
Turno F	19 Maggio
Turno G	20 Maggio

La relazione deve essere consegnata, una per gruppo e su carta, entro dodici giorni (deve potere essere corretta in tempo per il primo appello orale)

Misura del calore specifico di metalli

In questo esperimento viene misurato il calore specifico di due metalli, rame e alluminio.

Si utilizza un calorimetro delle mescolanze (o di Regnault).

I valori accettati dei due calori specifici sono:

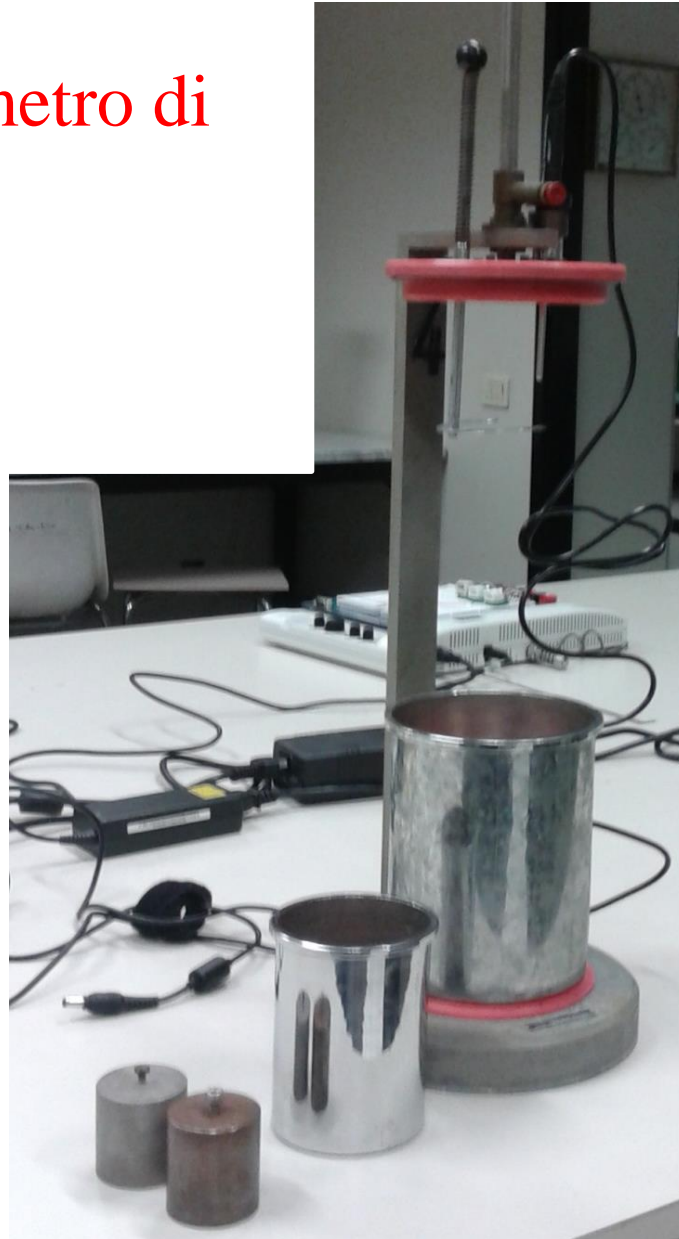
$$c_{\text{Cu}} = 385 \frac{\text{J}}{\text{kg K}} \quad c_{\text{Al}} = 896 \frac{\text{J}}{\text{kg K}}$$

Come corollario, si può verificare la legge di Dulong e Petit:

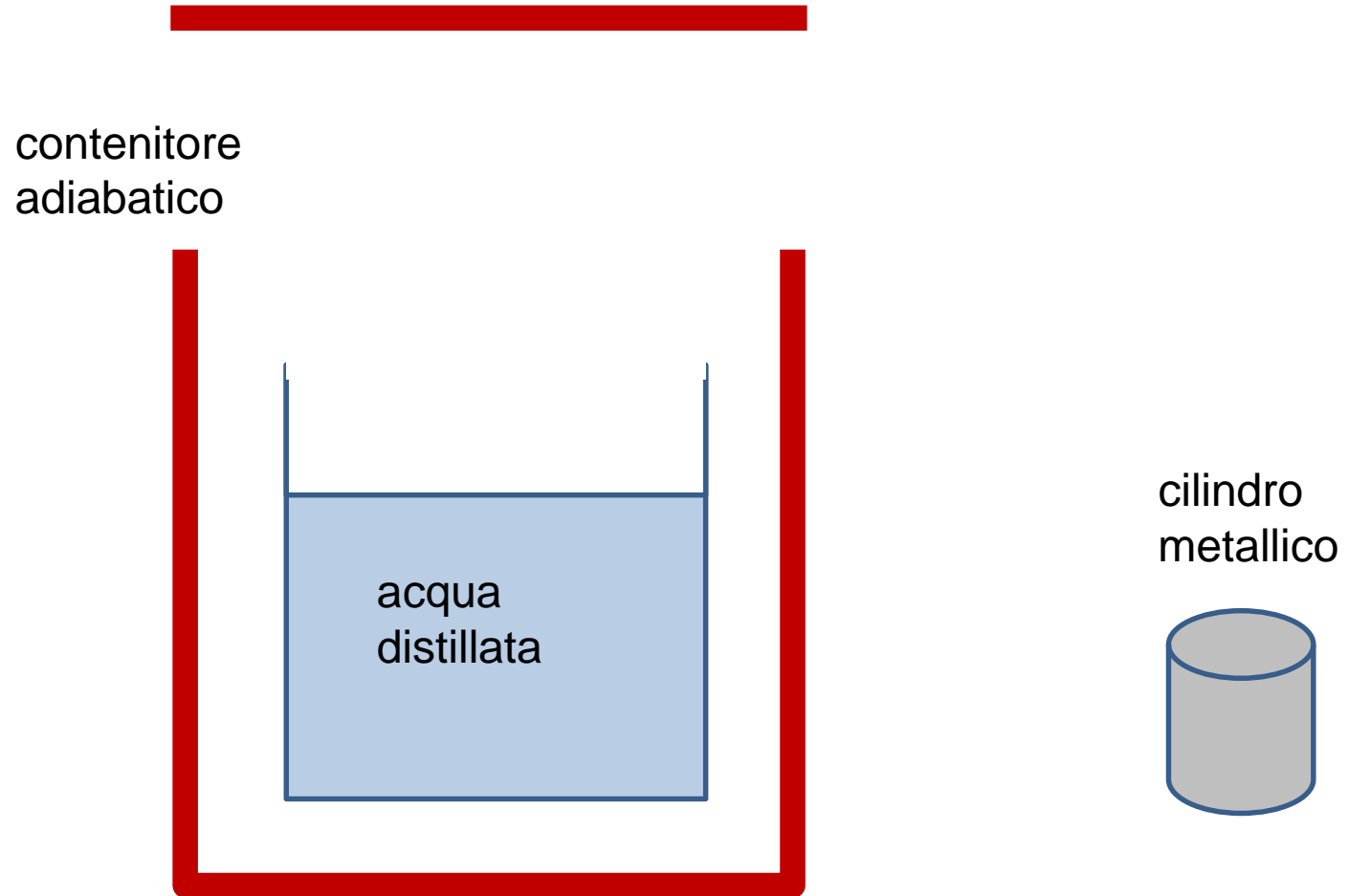
$$\text{calore specifico} \cdot \text{peso atomico} \approx 3R \approx 25 \frac{\text{J}}{\text{mol K}}$$

(circa) indipendente dalla sostanza.

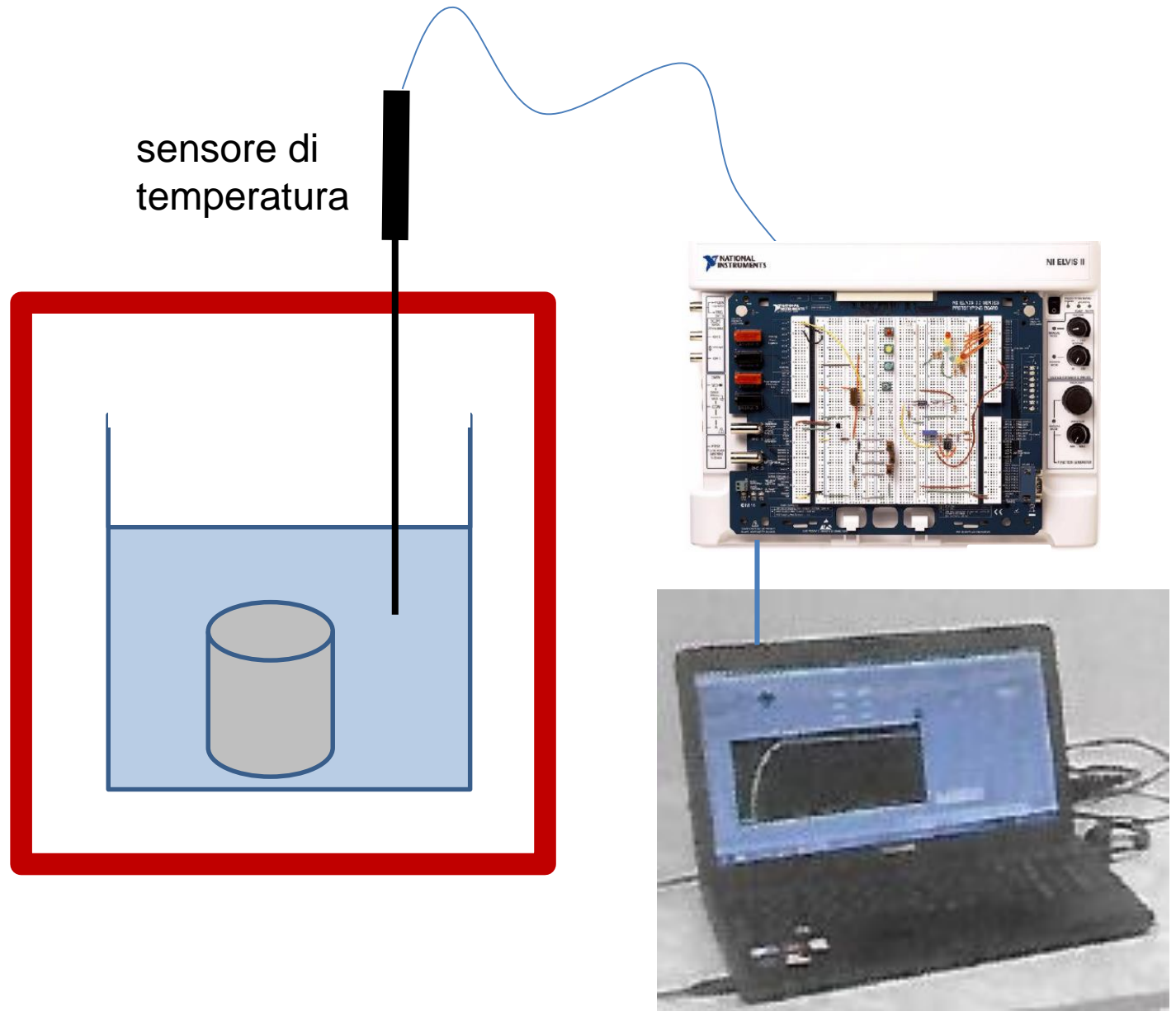
Il calorimetro di Regnault



Metallo a circa 100°C e acqua distillata a temperatura ambiente...



...messi a contatto raggiungono l'equilibrio termico.



Scambio di calore tra metallo e acqua distillata, in ambiente isolato:

$$Q = c_{\text{H}_2\text{O}} m_{\text{H}_2\text{O}} (T_f - T_{\text{H}_2\text{O}}) = c_x m_x (T_x - T_f)$$

da cui:

$$c_x = \frac{m_{\text{H}_2\text{O}} (T_f - T_{\text{H}_2\text{O}})}{m_x (T_x - T_f)} c_{\text{H}_2\text{O}}$$

c_x e $c_{\text{H}_2\text{O}}$ sono i calori specifici del metallo e dell'acqua;

m_x e $m_{\text{H}_2\text{O}}$ sono le masse del metallo e dell'acqua;

T_x e $T_{\text{H}_2\text{O}}$ sono le temperature iniziali del metallo e dell'acqua,

T_f è la temperatura finale del sistema.

Si commetterebbe un errore sistematico se non si tenesse conto dell'equivalente in acqua del calorimetro m_e .

m_e rappresenta il rapporto C/c_{H_2O} tra la capacità termica del materiale del calorimetro e c_{H_2O}

$m_e(T_f - T_{H_2O})c_{H_2O}$ corrisponde quindi alla quantità di calore assorbita dal calorimetro.

$$c_x = \frac{(m_{H_2O} + m_e)(T_f - T_{H_2O})}{m_x (T_x - T_f)} c_{H_2O}$$

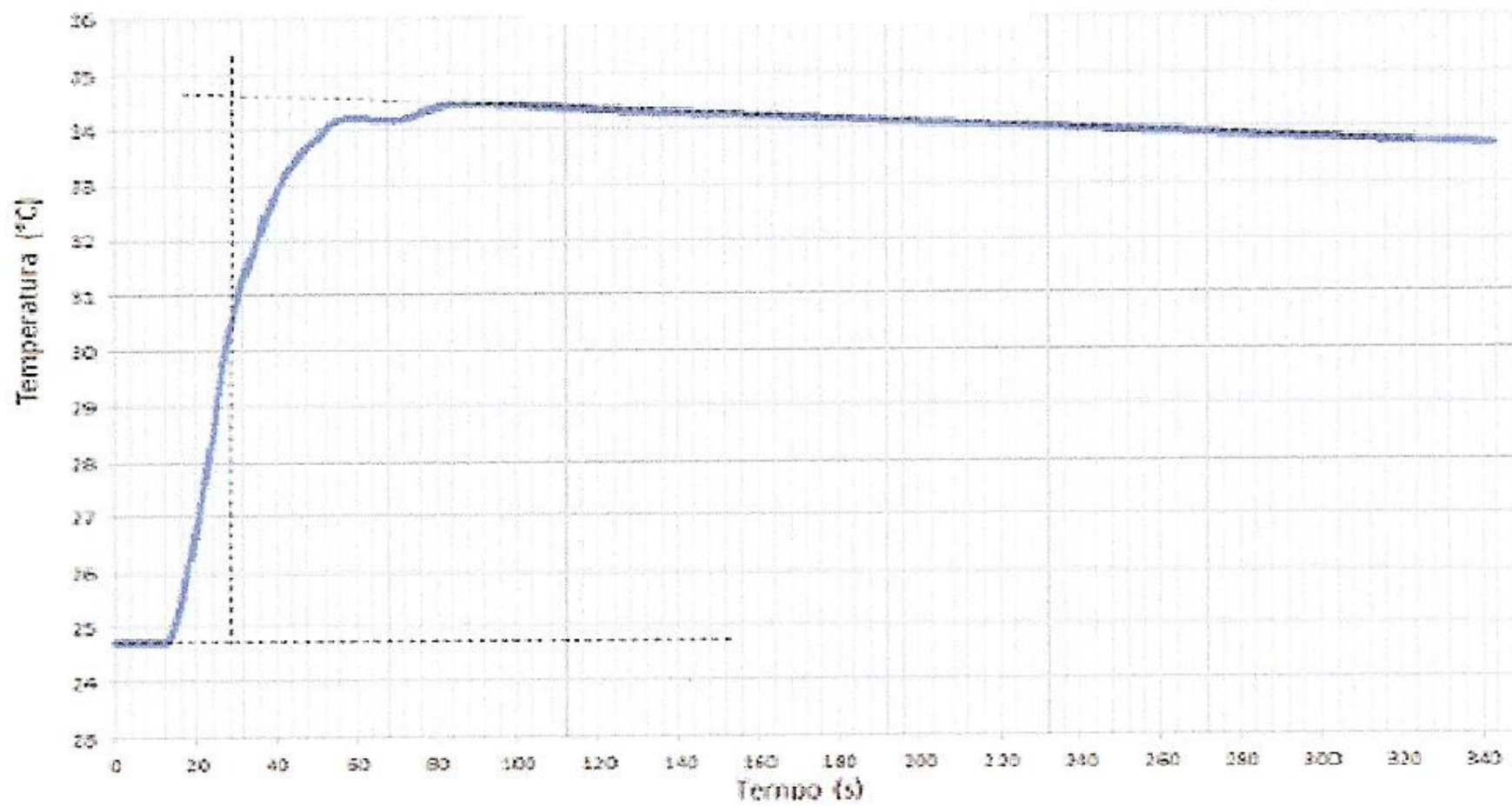
Le masse m_x e m_{H_2O} sono misurate con una bilancia di risoluzione 1 g.

Fare in modo che m_{H_2O} sia circa uguale a 320 g, in modo che il sensore di temperatura sia bene inserito nell'acqua, a calorimetro chiuso.

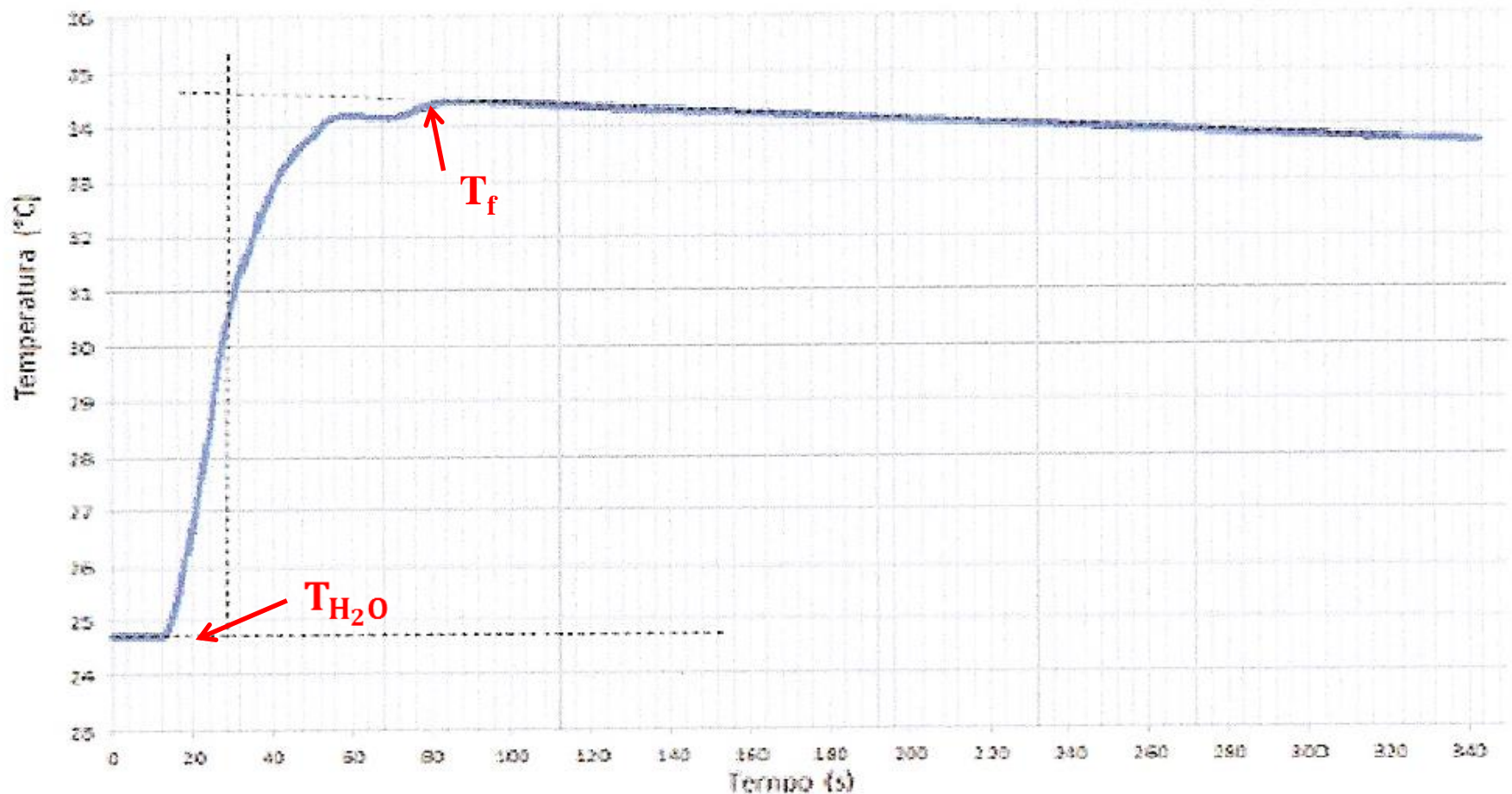
Le temperature T_x , T_{H_2O} e T_f sono misurate per mezzo di un sensore di temperatura (lo stesso usato nella calibrazione della termocoppia) collegato a Elvis e visualizzate su schermo tramite un programma LabVIEW.



Grafico della temperatura in funzione del tempo



T_{H_2O} e T_f sono misurate a partire dal grafico della temperatura in funzione del tempo



il piccolo (alcuni decimi di grado) errore sistematico su T_f dovuto alla perdita di calore dal calorimetro, non perfettamente adiabatico, può essere stimato con un metodo grafico.

Misura di m_e

La misura di m_e avviene in modo analogo alla misura di c_x , sostituendo però una massa m^* di acqua distillata alla massa m_x di metallo. In questo modo $c_x = c_{H_2O}$ non è più una incognita.

Inserendo m^* di acqua a temperatura T^* (inferiore a 100°C per evitare perdite di massa per evaporazione) in m_{H_2O} di acqua a temperatura ambiente T_{H_2O} si raggiunge l'equilibrio a temperatura T_f .

$$m_e = \frac{m^* (T^* - T_f)}{(T_f - T_{H_2O})} - m_{H_2O}$$

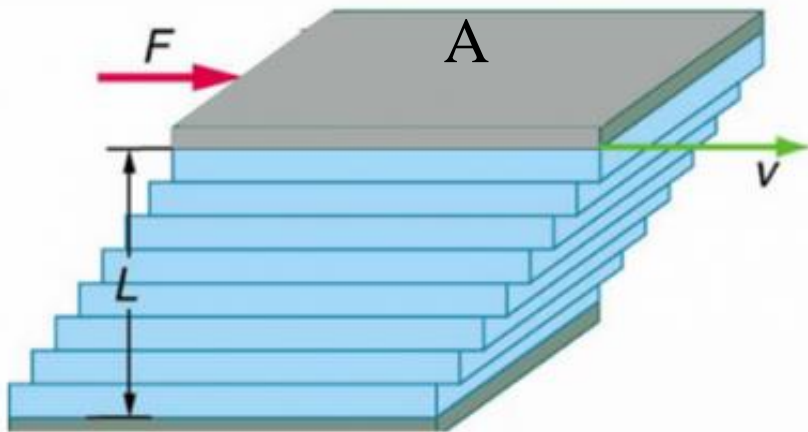
$$c_x = \frac{(m_{H_2O} + m_e)(T_f - T_{H_2O})}{m_x(T_x - T_f)} c_{H_2O}$$

$$\frac{\Delta c_x}{c_x} = \frac{\Delta m_{H_2O} + \Delta m_e}{m_{H_2O} + m_e} + \frac{\Delta m_x}{m_x} + \frac{\Delta T_{H_2O}}{T_f - T_{H_2O}} + \frac{\Delta T_x}{T_x - T_f} + \frac{(T_x - T_{H_2O})\Delta T_f}{(T_f - T_{H_2O})(T_x - T_f)}$$

L'errore relativo su c_x è espresso dalla somma di cinque termini; quali sono quelli dominanti ?

Misura del coefficiente di viscosità di un liquido

In questo esperimento viene misurato il coefficiente di viscosità di un liquido, la **glicerina**

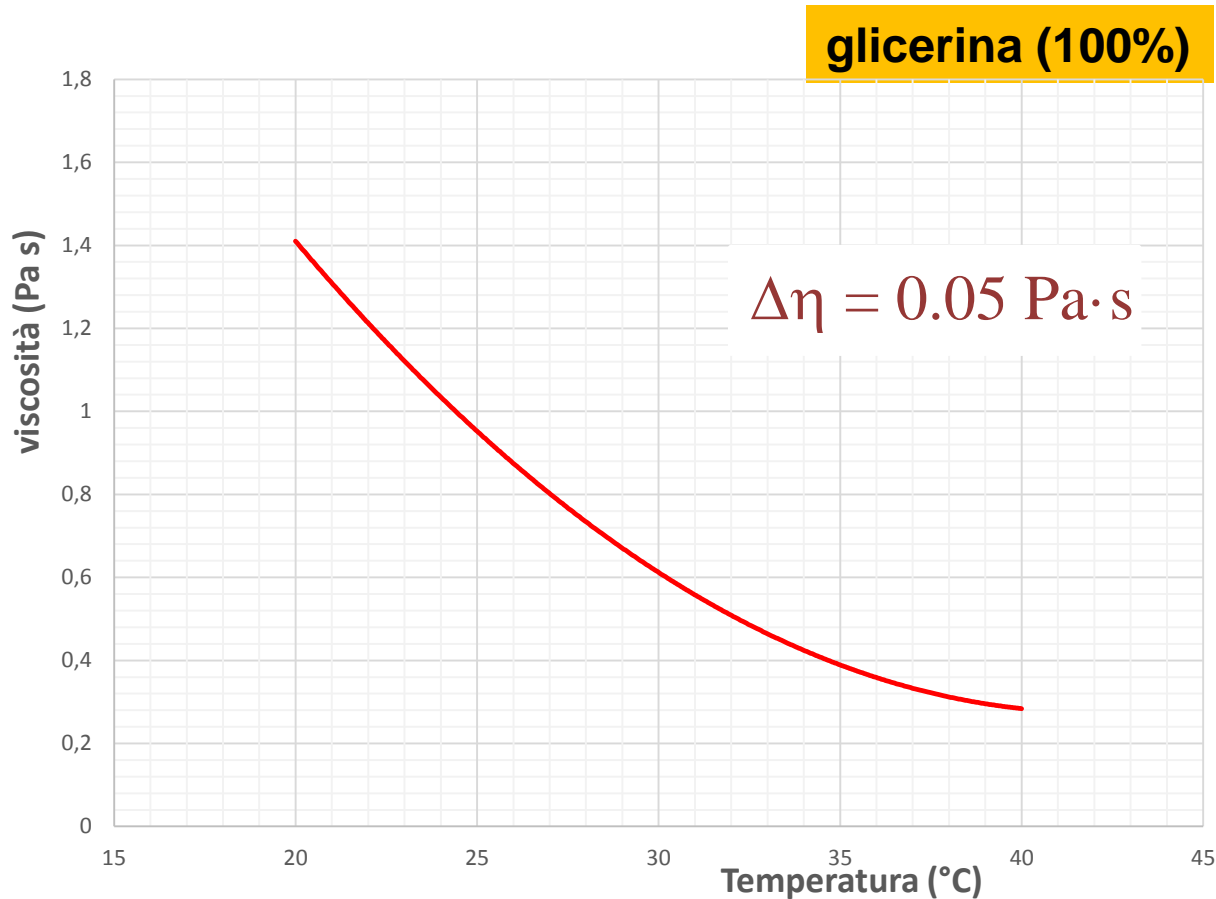


$$F \propto \frac{Av}{L}$$

$$F = \eta \frac{Av}{L}$$
A red arrow points from below to the Greek letter η in the equation.

coefficiente di viscosità (misurato in Pa·s)

La viscosità di un fluido dipende fortemente dalla temperatura. Registrare la temperatura all'inizio e alla fine della presa dati e inserire i due valori nella relazione.



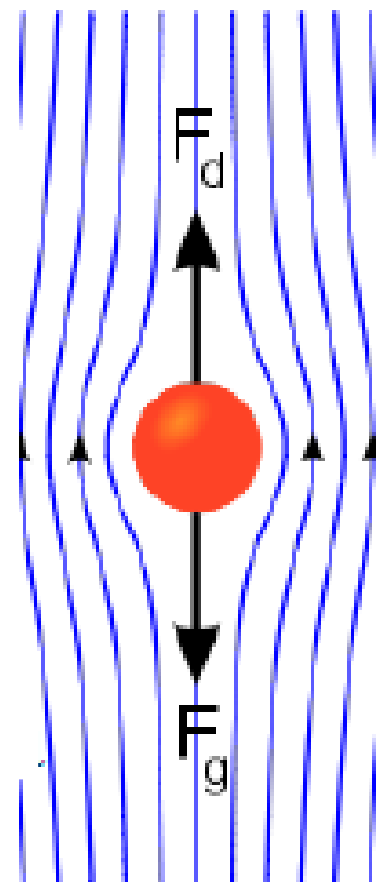
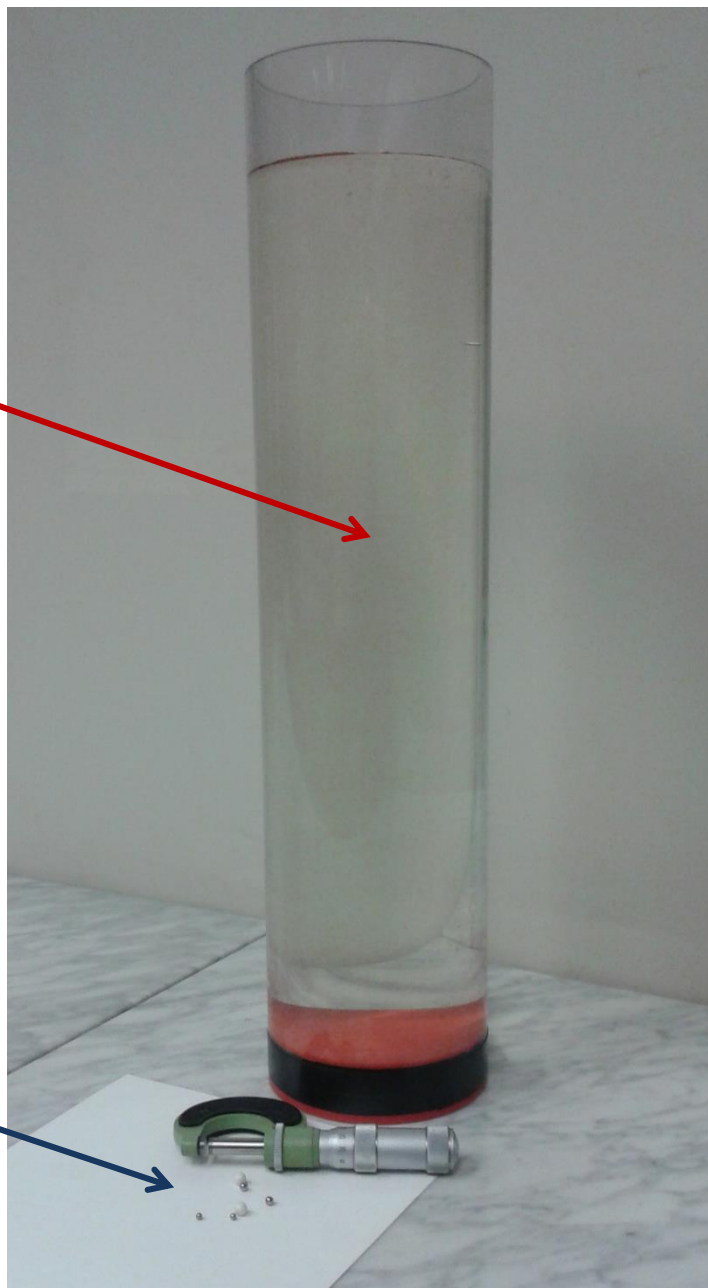
Viscosità della glicerina in funzione della temperatura e del contenuto di acqua

% di glicerina	Temperatura (°C)				
	10	20	30	40	50
90	498	219	109	60.0	35.5
91	592	259	127	68.1	39.8
92	729	310	147	78.3	44.8
93	860	367	172	89	51.5
94	1040	437	202	105	58.4
95	1270	523	237	121	67.0
96	1580	624	281	142	77.8
97	1950	765	340	166	88.9
98	2460	939	409	196	104
99	3090	1150	500	235	122
100	3900	1410	612	284	142

viscosità η in mPa·s

glicerina in contenitore
di plastica trasparente

sferette
(acciaio e
plastica)



Le forze che agiscono su una piccola sfera che cade all'interno di un fluido sono il suo peso, la spinta idrostatica e l'attrito dovuto al fluido.

Il peso F_G di una sferetta di raggio r è dato da:

$$F_G = \frac{4}{3} \pi r^3 \cdot \rho_{\text{sfera}} \cdot g$$

La spinta idrostatica (o forza di Archimede) F_A corrisponde a:

$$F_A = - m_{\text{fluido spostato}} \cdot g = - \frac{4}{3} \pi r^3 \cdot \rho_{\text{fluido}} \cdot g$$

Se agissero solo la forza peso e la spinta idrostatica, il corpo sarebbe sottoposto a una forza non nulla (se di densità diversa da quella del fluido in cui è immerso):

$$F_G + F_A = \frac{4}{3} \pi r^3 \cdot (\rho_{\text{sfera}} - \rho_{\text{fluido}}) \cdot g$$

In realtà, il corpo raggiunge una certa velocità (velocità limite) per poi proseguire di moto uniforme. La risultante del peso e della spinta idrostatica è infatti bilanciata da una forza proporzionale alla velocità, dovuta all'attrito che il fluido esercita sulla sfera.

In base alla legge di Stokes, nelle approssimazioni di:

- corpo sferico
- moto laminare
- dimensioni infinite del recipiente

**condizione
non rispettata
($R \approx 5.5 \text{ cm}$)**

la forza di attrito F_v corrisponde a:

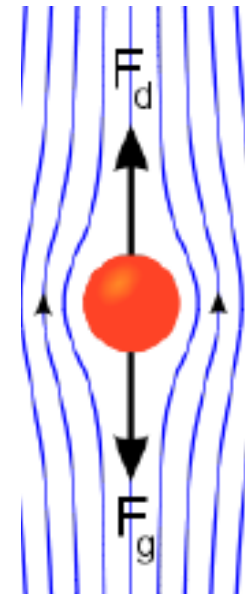
$$F_v = -6\pi \eta \cdot r \cdot v$$

dove η è la viscosità del fluido e v la velocità della sfera. Quindi:

$$F_{TOT} = F_G + F_A + F_v$$

In condizioni di regime, $F_{TOT} = 0$, dunque:

$$\frac{2}{9} (\rho_S - \rho_F) g r^2 = \eta v$$



Il raggio r della sferetta d'acciaio si misura direttamente con un micrometro.

La densità delle sfere ρ_s si misura indirettamente:

$$\rho_s = \mathbf{M_s} / (4/3 \pi \mathbf{r^3})$$

L'errore relativo sulla misura di ρ_s può essere ridotto misurando la massa $(N \cdot M_s)$ di N sferette dello stesso raggio contemporaneamente.

Nel nostro caso $N = 3$

La densità del fluido ρ_F si ottiene indirettamente come

$$\rho_F = M_F / V_F$$

misurando la massa M_F di fluido corrispondente ad un volume V_F contenuto in una provetta graduata.

Misura della velocità di caduta delle sfere

La velocità limite di caduta v della sfera si ricava dal rapporto fra la misura della lunghezza di caduta, fatta con un metro graduato, e la misura del tempo di caduta. Per quest'ultima, poiché le fluttuazioni statistiche sono più grandi della sensibilità del cronometro, sono necessarie prove ripetute.

In alternativa, si registra, con il programma Perrin_IMAQ e utilizzando una camera CCD, la sequenza di frame relativa alla caduta di ogni sferetta e poi la si analizza con il programma Perrin_Analyser, ottenendo il grafico lineare posizione-tempo il cui coefficiente angolare è la velocità di caduta.

Questa misura richiede una calibrazione, cioè la determinazione del coefficiente di conversione pixel \rightarrow mm



In base alla misura con la camera CCD, la velocità è ottenuta da

$$v(\text{mm/s}) = v^*(\text{px/s}) \cdot \gamma (\text{mm/px})$$

dove γ è il fattore di conversione da pixel a mm.

L'incertezza sulla velocità è quindi

$$\Delta v = v \cdot \left(\frac{\Delta v^*}{v^*} + \frac{\Delta \gamma}{\gamma} \right)$$

Δv^* è valutato come incertezza sul coefficiente angolare del fit lineare dello spazio percorso (in pixel) in funzione del tempo.

$\Delta \gamma$ è valutato in base alla calibrazione; se un segmento di n pixel misura $(x \pm \Delta x)$ mm, allora $\Delta \gamma = \Delta x/n$, cioè $\frac{\Delta \gamma}{\gamma} = \frac{\Delta x}{x}$

Correzione della velocità

La velocità misurata v deve essere corretta per l'effetto (sistematico) dovuto al raggio finito del tubo:

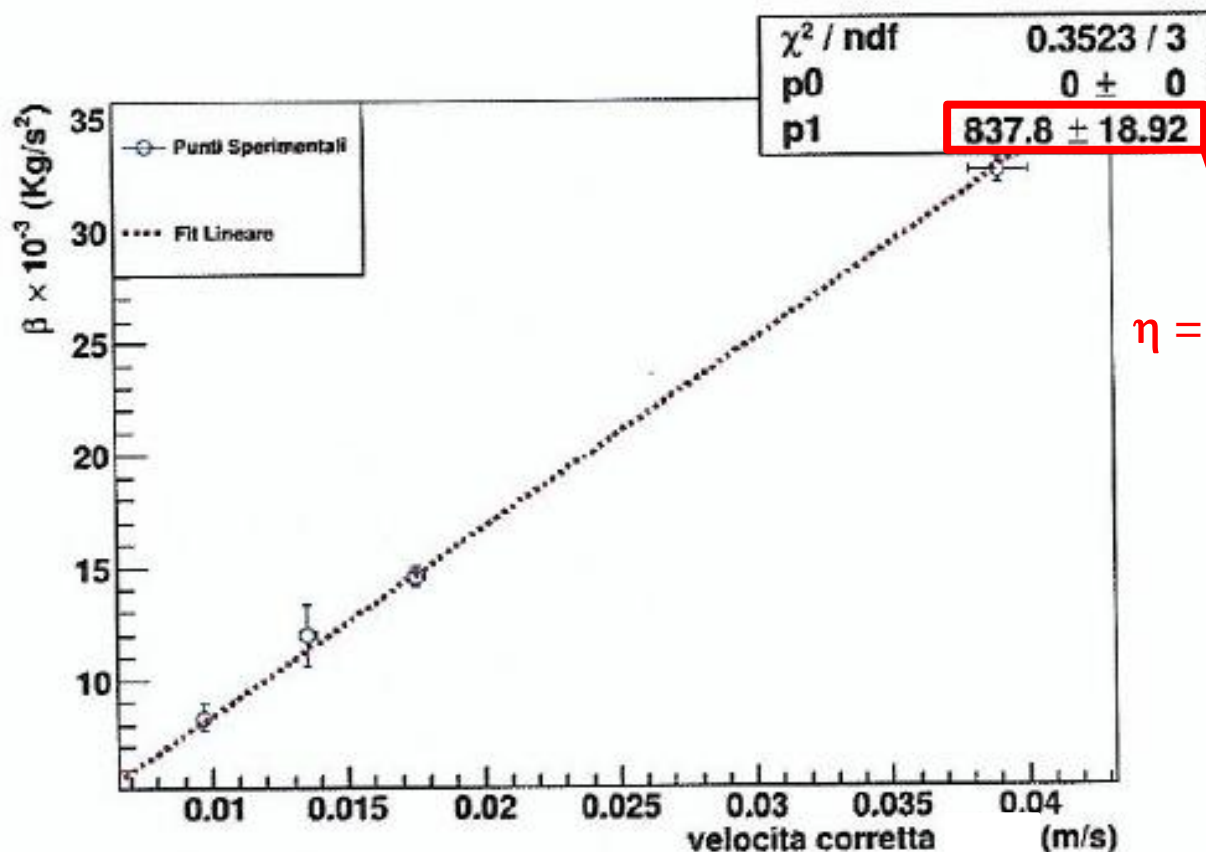
$$v_{corr} = v \left(1 + 2,4 \frac{r}{R} \right)$$

dove R è il raggio interno del tubo e r il raggio della sferetta.

La correzione non è trascurabile: nel caso delle sfere più grandi ($r = 3 \text{ mm}$) è del 13% circa.

Fare il grafico di $\beta = \frac{2(\rho_S - \rho_F)gr^2}{9}$ in funzione di v_{corr}

Fare poi il *fit* lineare ai dati: il coefficiente angolare rappresenta la viscosità η del liquido (glicerina).



$\eta = (0.838 \pm 0.019) \text{ Pa}\cdot\text{s}$

Fare due grafici, e quindi due fit, separati per le velocità misurate con i due metodi diversi.

Il fit lineare, a un solo parametro, deve essere un fit pesato, che tiene cioè conto delle incertezze $\Delta\beta$ e Δv diverse da punto a punto.

Calcolo di $\Delta\beta$

$$\beta = \frac{2}{9} g(\rho_S - \rho_F) r^2 = \frac{g}{9\pi} \frac{M}{d} - \frac{g}{18} \frac{(M_{\text{tot}} - M_{\text{tara}}) d^2}{V} = A - B$$

dove:

$M = 3M_s$ = massa di tre sferette uguali

$d = 2r$ = diametro di una sferetta

M_{tot} = massa di tubo graduato + massa glicerina

M_{tara} = massa del solo tubo graduato

V = volume della glicerina nel tubo graduato

quindi

$$\Delta\beta = A \frac{\Delta M}{M} + B \left(\frac{\Delta M_{\text{tot}} + \Delta M_{\text{tara}}}{M_{\text{tot}} - M_{\text{tara}}} + \frac{\Delta V}{V} \right) + (A + 2B) \frac{\Delta d}{d}$$

Integrando l'equazione del moto $F_G + F_A + F_V = ma$, e utilizzando i dati acquisiti, fare (ad es. con Excel) un grafico della velocità in funzione della distanza di caduta. Si può calcolare $y(t)$ e $v(t)$ ogni 1.5 ms (ad esempio) e poi fare il grafico di v in funzione di y

