Università Degli Studi di Padova
Dipartimento di Ingegneria dell'Informazione (DEI)
Corsi di laurea in Ingegneria

Studente: Federico Simioni
Email: federico.simioni@studenti.unipd.it
Disciplina: Fisica Generale 1

Lezione 9

1 Un cilindro cavo di raggio R = 8 cm e massa M = 4 kg viene lasciato libero di rotolare giù dalla sommità di un cuneo di altezza h = 300 cm e angolo $\theta = 35°$ rispetto all'orizzontale, che può scivolare liberamente sul piano di appoggio. Sapendo che il cilindro scendendo lungo il piano inclinato si muove di moto di puro rotolamento e che il cuneo viene mantenuto fermo da una opportuna forza orizzontale, determinare:

1. la velocità del cilindro (cioè del suo centro di massa) in fondo al cuneo;
2. il minimo valore del coefficiente di attrito statico μ_s, affinchè il moto sia di puro rotolamento;
3. il modulo e il verso della forza necessaria per tenere fermo il cuneo durante la discesa del cilindro.

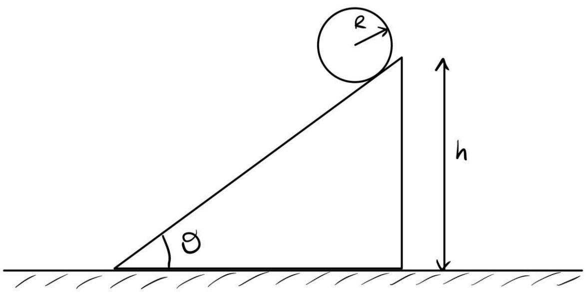

Figura 1: Rappresentazione grafica esercizio 1.

2 Un cilindro, di massa m = 100 kg (la massa è distribuita omogeneamente in tutto il suo volume) e raggio R = 30 cm, poggia su un piano orizzontale. Intorno al cilindro è stata avvolta una corda ideale (inestensibile e di massa trascurabile) e tramite essa (vedi Figura 2) il cilindro viene tirato con una forza $\vec{F}$ parallela al piano di appoggio. Sapendo che al contatto tra cilindro e piano corrispondono i coefficienti di attrito statico e dinamico $\mu_s = 0.25$ e $\mu_d = 0.2$, determinare nei casi in cui il modulo di $\vec{F}$ è pari a $F_1 = 500$ N o $F_2 = 1000$ N:

1. il tipo di moto che segue il cilindro;
2. l'accelerazione a_{cm} del suo centro di massa e la sua accelerazione angolare α;
3. il modulo e la direzione della forza di attrito presente, precisando se si tratta di attrito statico o dinamico.

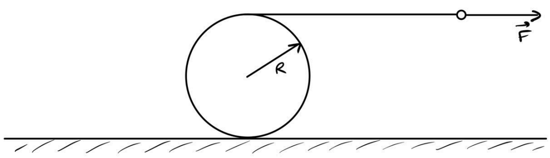

Figura 2: Rappresentazione grafica esercizio 2.

(3) Si consideri un cilindro omogeneo di massa m = 20 kg e raggio R = 25 cm e un piano inclinato di un angolo $\theta = 35°$ rispetto all'orizzontale. Nel primo caso il cilindro viene lasciato andare, da fermo, sul piano inclinato e prende a scendere liberamente su di esso. Determinare:

1. il minimo valore del coefficiente di attrito statico affinchè il cilindro rotoli senza mai scivolare lungo il piano inclinato;
2. l'accelerazione del centro di massa del cilindro durante il moto.

Nel secondo caso, il cilindro viene dotato inizialmente di un moto traslatorio parallelo al piano inclinato (diretto verso il basso) con una velocità del centro di massa pari a $v_{cm,0} = 8$ m/s. A causa dell'iniziale moto traslatorio, il cilindro slitta inizialmente sul piano inclinato. Tale slittamento può avere una fine (e il moto diventare di puro rotolamento) solo se il coefficiente di attrito dinamico è sufficientemente grande.

3. Descrivere i vari aspetti della situazione.
4. Determinare al di sopra di quale valore di μ_d lo slittamento avrà una fine.

[*Supporre che il piano inclinato sia infinitamente lungo. Nel secondo caso supporre che il coefficiente di attrito statico sia non minore di quanto ricavato al punto 1).*]

(4) Un cilindro omogeneo di massa M = 10 kg e raggio R = 12 cm poggia su un piano orizzontale. Al centro di massa del cilindro è agganciata una corda ideale (inestensibile e di massa trascurabile), al cui altro estremo è appeso un corpo di massa m. La puleggia mostrata in Figura 3 si intende di massa trascurabile e priva di attrito. Sapendo che il coefficiente di attrito statico tra il cilindro e piano è $\mu_s = 0.25$, determinare:

1. il valore massimo di m entro il quale il moto del cilindro è di puro rotolamento.

Sapendo poi che il coefficiente di attrito dinamico tra cilindro e piano è $\mu_d = \mu_s/2$ e supponendo m = 25 kg, determinare:

2. il tipo di moto del cilindro (puro rotolamento o no);
3. l'accelerazione lineare con cui scende il corpo di massa m e l'accelerazione angolare del cilindro.

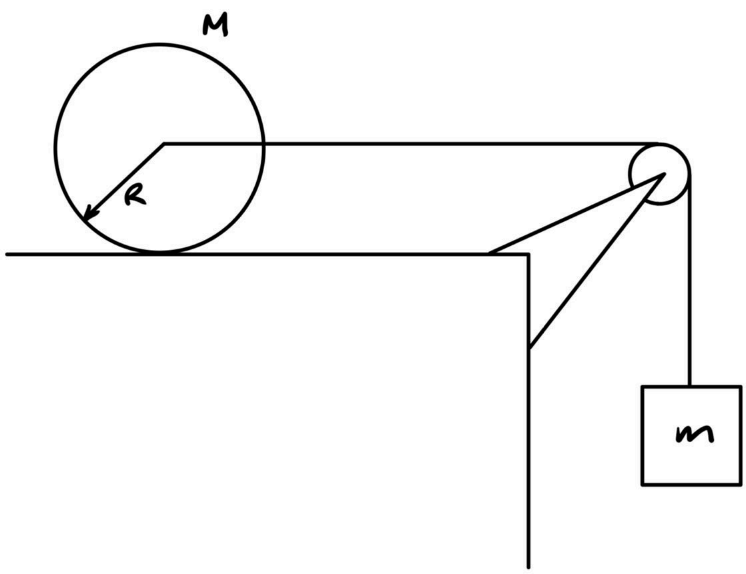

Figura 3: Rappresentazione grafica esercizio 4.

(5) Un'asta sottile rigida, di massa M = 2 kg e lunghezza l = 40 cm, è agganciata per un estremo a un punto fisso intorno al quale può ruotare liberamente. L'asta, inizialmente orizzontale, viene (da ferma) abbandonata al suo peso; quando l'asta raggiunge la posizione verticale il suo estremo libero urta elasticamente contro un corpo (fermo fino a quel momento) di massa m. Sapendo che subito dopo l'urto il corpo parte orizzontalmente con velocità v e l'asta rimbalza all'indietro raggiungendo una deflessione massima dalla verticale pari a $\theta = 45°$, si determini:

1. le velocità angolari dell'asta subito prima e subito dopo l'urto;
2. le velocità del corpo subito dopo l'urto nonchè la sua massa.

(6) Si abbia un recipiente di vetro a base quadrata di sezione A = 900 cm^2 aperto superiormente. Sul suo bordo è poggiata un'asticella rigida al cui punto di mezzo è appesa una molla ideale di costante elastica k. All'altro estremo della molla è agganciato un corpo omogeneo di forma cubica, di massa m = 900 g e volume V_m = 1 dm^3. Nel recipiente è presente una quantità di acqua di volume V_0 (vedi Figura 4), tale che quando il corpo è in equilibrio statico esso risulta immerso per metà, la molla risulta allungata di un Δy_0 = 8 cm e la faccia inferiore del corpo si trova a una distanza h_0 = 5 cm dal fondo del recipiente. Determinare:

1. la costante elastica k della molla;
2. il volume V_0 (espresso in litri) dell'acqua presente nel recipiente.

Supponendo poi che venga aggiunta altra acqua fino a che la faccia inferiore del corpo si porti a una distanza dal fondo pari a h_1 = 12 cm, si determini:

3. per quale frazione della sua altezza il corpo risulta immerso;
4. il volume finale V_1 (espresso in litri) dell'acqua presente nel recipiente.

[*Supporre che la molla abbia massa trascurabile e che rimanga sempre verticale.*]

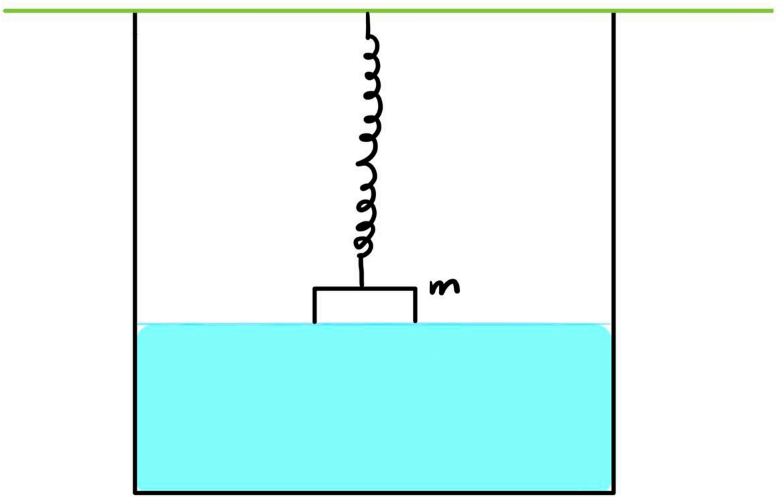

Figura 4: Rappresentazione grafica esercizio 6.

(7) Un oste toglie il tappo di una botte, posto a h = 70 cm dal fondo, per prelevare del vino. La botte, chiusa (ermeticamente), è alta 10 m ed è piena fino ad un'altezza s = 6 m. Tolto il tappo il vino inizia a zampillare, uscendo dalla botte in direzione orizzontale, con velocità v_0 e toccando il suolo (alla stessa quota del fondo della botte) a una distanza d = 4.5 m (si supponga che le particelle di vino abbiano densità pari a quella dell'acqua e che compiano una traiettoria parabolica analoga a quella di un proiettile). Determinare la pressione p_s sulla superficie del vino nella botte a quota s.

ES. 1

Usando la conservazione dell'energia meccanica del cilindro tra la partenza e l'arrivo ai piedi del carrello, possiamo scrivere ⊛→ VEDI LA FINE DELL'ESERCIZIO

$$Mgh = \frac{1}{2} M v_{cm}^2 + \frac{1}{2} I \omega^2$$

Tenendo conto del fatto che, essendo il moto di puro rotolamento, è $\omega = v_{cm}/R$ e per il cilindro cavo in questione è $I = MR^2$, ricaviamo

$$Mgh = M v_{cm}^2 \quad \Rightarrow \quad v_{cm} = \sqrt{gh} = 5.42 \ m/s$$

Durante la discesa, il moto del cilindro è determinato dalle seguenti relazioni:

$$\begin{cases} M a_{cm} = Mg \sin\theta - F_s \\ I\alpha = I \frac{a_{cm}}{R} = R F_s \end{cases}$$

Dove F_s è la forza di attrito statico che garantisce che il moto sia di puro rotolamento. Quindi

$$a_{cm} = \frac{R^2}{I} F_s \quad \Rightarrow \quad a_{cm} = \frac{Mg \sin\theta}{M + \frac{I}{R^2}} \quad \Rightarrow \quad F_s = \frac{Mg I \sin\theta}{MR^2 + I} = \frac{1}{2} Mg \sin\theta$$

e conseguentemente $\quad F_s \leq F_{s,max} = \mu_s N = \mu_s Mg \cos\theta$

$$\Rightarrow \frac{1}{2} Mg \sin\theta \leq \mu_s Mg \cos\theta$$

$$\Rightarrow \mu_s \geq \frac{1}{2} \tan\theta = 0.35$$

Mentre il cilindro scende rotolando, la superficie del carrello esercita le forze $\vec{F_s}$ e $\vec{N}$, le cui componenti orizzontale e verticale sono $(F_s \cos\theta, F_s \sin\theta)$ e $(-N \sin\theta, N \cos\theta)$, rispettivamente. Per la terza legge della dinamica il cilindro esercita sul carrello due forze uguali e opposte, pari a $-\vec{F_s}$ e $-\vec{N}$. Se vogliamo che il carrello rimanga in quiete dovremo esercitare una forza $\vec{F}$ orizzontale che bilanci le componenti orizzontali di tali forze. Cioè

$$F - F_s \cos\theta + N \sin\theta = 0 \Rightarrow F = F_s \cos\theta - N \sin\theta = \frac{1}{2} Mg \sin\theta \cos\theta - Mg \cos\theta \sin\theta$$

Dalla quale si ottiene: $\quad F = -\frac{1}{2} Mg \sin\theta \cos\theta = -9.2 \ N$

Il segno negativo ci dice che tale forza è diretta verso sinistra.

⊛ A voler essere precisi, quando il cilindro raggiunge il piano orizzontale il suo centro di massa non scende di una quota h, ma di $h - R(1-\cos\theta) = 2.985 \ m$

→ Nella soluzione non si è tenuto conto di ciò, visto che ai fini del risultato i valori cambiano pochissimo (si otterrebbe $v_{cm} = 5.41 \ m/s$)

ES. 2

Supponiamo inizialmente che il moto del cilindro sia di puro rotolamento e verifichiamo le condizioni alle quali questo sarà possibile. Applicando la 2ª legge della dinamica in forma angolare all'asse passante per il punto di istantaneo contatto, possiamo scrivere

$$I_P\,\alpha = 2RF \quad\Rightarrow\quad \alpha = \frac{2RF}{I_P} = \frac{2RF}{\frac{3}{2}mR^2} = \frac{4}{3}\cdot\frac{F}{mR}$$

Dove $I_P = I + mR^2 = \frac{1}{2}mR^2 + mR^2 = \frac{3}{2}mR^2$ è il momento d'inerzia del cilindro rispetto all'asse per il punto di istantaneo contatto.
Notando poi che nelle stesse condizioni è $a_{cm} = R\alpha = \frac{4}{3}\cdot\frac{F}{m}$, considerando la 2ª legge della dinamica in forma lineare, otteniamo

$$ma_{cm} = F + F_a \quad\Rightarrow\quad F_a = ma_{cm} - F = \frac{1}{3}F$$

che ci dimostra anche che la forza di attrito statico che agisce sul cilindro è concorde con la forza $\vec{F}$.
Da questo, ricaviamo che, se il moto del cilindro è di puro rotolamento, dovrà essere

$$F_a \leq \mu_s N = \mu_s mg \quad\Rightarrow\quad \mu_s \geq \frac{F_a}{mg} = \frac{F}{3mg} \quad\Rightarrow\quad \begin{cases} F = F_1 \Rightarrow \mu_s \geq \dfrac{F_1}{3mg} = 0.17 \\ F = F_2 \Rightarrow \mu_s \geq \dfrac{F_2}{3mg} = 0.34 \end{cases}$$

Da questo risultato possiamo capire che, essendo $\mu_s = 0.25$, nel caso 1 $(F = F_1)$ il moto del cilindro sarà effettivamente di puro rotolamento. Da quanto scritto sopra possiamo scrivere che in tale caso sarà

$$a_{cm,1} = \frac{4}{3}\cdot\frac{F_1}{m} = 6.67\ m/s^2; \qquad \alpha_1 = \frac{4}{3}\cdot\frac{F_1}{mR} = 22.2\ rad/s^2; \qquad F_{1,a} = \frac{1}{3}F_1 = 167\ N$$

Al contrario, quando la forza $\vec{F}$ ha modulo $F_2 = 1000\,N$, la forza di attrito statico massima non è sufficiente a non far slittare il cilindro e quindi esso eseguirà un moto rototraslatorio in cui la condizione $\alpha = a_{cm}/R$ non sarà più rispettata.
In tal caso, il moto sarà determinato dalle due seguenti equazioni indipendenti

$$\begin{cases} ma_{2,cm} = F_2 + F_d \\ I\alpha_2 = RF_2 - RF_d \end{cases}$$

dove ora $F_d = \mu_d N = \mu_d mg$ è la forza di attrito dinamico. Risolvendo, si ricava

$$a_{2,cm} = \frac{F_2}{m} + \mu_d g = 12\ m/s^2$$

$$\alpha_2 = \frac{R(F_2 - \mu_d mg)}{I} = 2\,\frac{(F_2 - \mu_d mg)}{mR} = 53.6\ rad/s^2$$

$$F_d = \mu_d mg = 196\,N$$

ES. 3

Prendiamo un asse x parallelo al piano inclinato e diretto nel verso del moto del cilindro. In tali condizioni, l'applicazione della 2ª legge della dinamica nelle forme lineare e angolare porta alle seguenti equazioni

$$\begin{cases} m a_{cm} = mg\sin\theta - F_s \\ I\alpha = R F_s \end{cases}$$

dove $I = \frac{1}{2}mR^2$ è il momento d'inerzia del cilindro rispetto all'asse passante per il suo centro di massa, $\alpha = a_{cm}/R$ è la sua accelerazione angolare e F_s è la forza di attrito statico necessaria affinché il moto sia di puro rotolamento.
Risolvendo si ottiene

$$a_{cm} = \frac{2}{3} g\sin\theta = 3.75\ m/s^2 ; \quad F_s = \frac{1}{2} m a_{cm} = \frac{1}{3} mg\sin\theta$$

Conseguentemente, dato che la reazione normale è pari a $N = mg\cos\theta$, per il coefficiente di attrito statico abbiamo

$$F_s \leq F_{s,max} = \mu_s N = \mu_s mg\cos\theta \Rightarrow \mu_s \geq \mu_{s,min} = \frac{|F_s|}{mg\cos\theta} = \frac{\tan\theta}{3} = 0.233$$

Se invece al cilindro viene data una velocità iniziale $v_{cm,0}$, allora esso striscerà sul piano inclinato e durante tale strisciamento le equazioni del moto saranno le seguenti

$$\begin{cases} m a_{cm} = mg\sin\theta - F_d = mg\sin\theta - \mu_d mg\cos\theta \\ I\alpha = R F_d = \mu_d R mg\cos\theta \end{cases}$$

dove ora $F_d = \mu_d N = \mu_d mg\cos\theta$ è la forza di attrito dinamico. Le due equazioni sono indipendenti e da esse possiamo ricavare le espressioni delle velocità del centro di massa e angolare in funzione del tempo. Si ottiene

$$a_{cm} = g\sin\theta - \mu_d g\cos\theta \Rightarrow v_{cm}(t) = v_{cm,0} + g(\sin\theta - \mu_d\cos\theta)\cdot t$$

$$\alpha = \frac{2\mu_d g}{R}\cos\theta \Rightarrow \omega(t) = \frac{2\mu_d g\cos\theta}{R}\cdot t$$

Da queste relazioni vediamo che durante lo strisciamento le velocità angolare e del centro di massa del cilindro variano linearmente nel tempo. Se ad un certo istante fra queste velocità varrà la relazione

$$R\omega(t_1) = v_{cm}(t_1) \Rightarrow 2\mu_d g\cos\theta\cdot t_1 = v_{cm,0} + g(\sin\theta - \mu_d\cos\theta)\cdot t_1$$

e l'istante t_1 dovrebbe essere dato da

$$t_1 = \frac{v_{cm,0}}{g(3\mu_d \cos\theta - \sin\theta)}$$

Dovendo essere, ovviamente, $t_1 > 0$, otteniamo la condizione

$$3\mu_d \cos\theta - \sin\theta > 0 \Rightarrow \mu_d > \mu_{d,min} = \frac{\sin\theta}{3\cos\theta} = \frac{\tan\theta}{3} = 0.233$$

La morale è quindi: lo slittamento ha fine solo se il coefficiente di attrito è maggiore di $\frac{1}{3}\tan\theta$ (anche pari a $\mu_{s,min}$). In caso contrario, il corpo slitta (indefinitamente) senza raggiungere mai la condizione di puro rotolamento.

$\boxed{\text{ES. 4}}$

Supponendo il moto del cilindro di puro rotolamento, l'applicazione della 2° legge della dinamica nelle forme lineare e angolare ai due corpi ci permette di scrivere le seguenti equazioni

$$\begin{cases} ma = mg - T \\ Ma = T - F_a \\ I\alpha = RF_a \end{cases}$$

dove a è l'accelerazione (verso il basso) del corpo appeso e (verso destra) del centro di massa del cilindro, α è l'accelerazione angolare del cilindro, T è la tensione della corda e $I = \frac{1}{2}MR^2$ è il momento d'inerzia del cilindro rispetto all'asse per il cdm. Tenendo presente che $\alpha = a/R$ (essendo il moto di puro rotolamento), risolvendo abbiamo

$$T = mg - ma; \quad F_a = \frac{I}{R^2}a; \quad \Rightarrow \quad \left(M + m + \frac{I}{R^2}\right)a = mg$$

$$\Rightarrow a = \frac{mg}{M + m + \frac{I}{R^2}} = \frac{2mg}{3M + 2m}; \quad F_a = \frac{Mmg}{3M + 2m}$$

Ma per F_a vale la seguente: $F_a \leq F_{a,max} = \mu_s N = \mu_s Mg$

E perciò otteniamo: $\frac{Mmg}{3M + 2m} \leq \mu_s Mg \Rightarrow m \leq m_1 = \frac{\mu_s}{1 - 2\mu_s} \cdot 3M = 15\ Kg$

Con $m = 25\ Kg$ superiamo il limite appena calcolato e quindi il cilindro non potrà più semplicemente rotolare: esso slitterà sul piano. In tal caso le equazioni del moto saranno le seguenti

$$\begin{cases} ma = mg - T \\ Ma = T - F_a = T - \mu_d Mg \\ I\alpha = RF_a = R\mu_d Mg \end{cases}$$

Dove ora $\alpha \neq a/L$. Combinando le prime due abbiamo

$$T = mg - ma; \quad (M+m)a = mg - \mu_d Mg \Rightarrow a = \frac{(m - \mu_d M)g}{M+m} = 6.67 \ m/s^2$$

Dalla terza otteniamo invece

$$\alpha = \frac{\mu_d RMg}{I} = \frac{2\mu_d g}{R} = 20.4 \ rad/s^2$$

$\boxed{\text{ES. 5}}$

Indichiamo con ω_1 e ω_2 i moduli delle velocità angolari dell'asta subito prima e subito dopo l'urto con la massa m. Considerando la rotazione iniziale dell'asta, la conservazione dell'energia meccanica comporta

$$\frac{1}{2} I\omega_1^2 - Mg\frac{l}{2} = 0 \Rightarrow \omega_1^2 = \frac{Mgl}{I}$$

Allo stesso modo, dopo l'urto avremo

$$-\frac{1}{2} I\omega_2^2 + Mg\frac{l}{2}(1-\cos\theta) = 0 \Rightarrow \omega_2^2 = \frac{Mgl}{I}(1-\cos\theta) = \left(1 - \frac{\sqrt{2}}{2}\right)\frac{Mgl}{I}$$

Osservando che il momento d'inerzia dell'asta è $I = \frac{1}{3}Ml^2$, ricaviamo

$$\omega_1 = \sqrt{\frac{Mgl}{I}} = \sqrt{\frac{3g}{l}} = 8.58 \ rad/s; \qquad \omega_2 = \sqrt{\left(1 - \frac{\sqrt{2}}{2}\right)\frac{3g}{l}} = 4.64 \ rad/s$$

Considerando ora l'urto, possiamo dire che, a causa delle forze impulsive nel punto dove è agganciata l'asta, il sistema asta+corpo non conserverà la sua quantità di moto. Si conservano invece l'energia cinetica (essendo un urto elastico) e il momento angolare rispetto al punto fisso dell'asta. La conservazione di queste due quantità impone le seguenti

$$\frac{1}{2} I\cdot\omega_1^2 = \frac{1}{2} I\omega_2^2 + \frac{1}{2}mv^2 \Rightarrow I(\omega_1^2 - \omega_2^2) = mv^2$$

$$I\omega_1 = -I\omega_2 + mlv \Rightarrow I(\omega_1 + \omega_2) = mlv$$

Dividendo membro a membro le relazioni a destra, otteniamo

$$\omega_1 - \omega_2 = \frac{v}{l} \Rightarrow v = l(\omega_1 - \omega_2) = 1.58 \ m/s$$

Sostituendo quest'ultima nella seconda delle precedenti, ricaviamo

$$m = \frac{I}{l^2}\frac{\omega_1 + \omega_2}{\omega_1 - \omega_2} = \frac{M}{3}\frac{\omega_1 + \omega_2}{\omega_1 - \omega_2} = 2.24 \ Kg$$

ES. 6

Se il corpo è in equilibrio statico, allora la risultante delle forze che agiscono su di esso è nulla. Pertanto

$$m\vec{g} + \vec{F_e} + \vec{F_A} = 0 \Rightarrow F_e + F_A - mg = 0$$

Dove $\vec{F_e}$ e $\vec{F_A}$ sono rispettivamente la forza elastica (diretta verso l'alto) espressa dalla molla e la spinta di Archimede (anch'essa verso l'alto). Essendo il corpo immerso in acqua per metà, abbiamo

$$F_A = \frac{1}{2} \rho_A V_m g$$

e quindi: $F_e = mg - \frac{1}{2}\rho_A V_m g = \rho_m V_m g - \frac{1}{2}\rho_A V_m g = \left(\rho_m - \frac{1}{2}\rho_A\right) V_m g$

Dove abbiamo indicato con $\rho_m = m/V_m = 0.9 \cdot 10^3 \, Kg/m^3$ e $\rho_A = 1 \cdot 10^3 \, Kg/m^3$ le densità del corpo e dell'acqua. Tenendo presente che è $F_e = K\Delta y_0$, si ricava

$$K = \frac{\left(\rho_m - \frac{1}{2}\rho_A\right) V_m g}{\Delta y_0} = 49.1 \, N/m$$

Essendo il lato del corpo pari a $\ell = 10 \, cm$, il volume dell'acqua presente nel recipiente è

$$V_0 = A\left(h_0 + \frac{\ell}{2}\right) - \frac{1}{2} V_m = 8.5 \cdot 10^{-3} \, m^3 = 8.5 \, L$$

Dopo l'aggiunta dell'acqua la faccia inferiore del corpo si porta a una distanza h_1 dal fondo del recipiente e quindi l'allungamento della molla si è ridotto a $\Delta y_1 = 1 \, cm$. Pertanto l'equilibrio statico del corpo comporta

$$F_e + F_A - mg = 0 \Rightarrow F_A = mg - F_e = mg - K\Delta y_1$$

e conseguentemente, essendo $F_A = \rho_A V_{m,i} g$, si ricava

$$V_{m,i} = \frac{mg - K\Delta y_1}{\rho_A g} = 8.5 \cdot 10^{-4} \, m^3 \Rightarrow \frac{V_{m,i}}{V_m} = 0.85$$

Dall'ultima relazione si vede che il corpo risulta immerso per l'85% del suo volume e quindi anche della sua altezza. Conseguentemente, il volume d'acqua presente nel recipiente è

$$V_1 = A(h_1 + 0.85 \cdot \ell) - 0.85 \cdot V_m = 1.76 \cdot 10^{-2} \, m^3 = 17.6 \, L$$

ES. 7

Per il moto delle particelle del vino zampillante possiamo scrivere le seguenti relazioni

$$\begin{cases} d = v_0 t \\ h = \frac{1}{2} g t^2 \end{cases} \Rightarrow \quad t = \sqrt{\frac{2h}{g}} \quad \Rightarrow \quad v_0 = \frac{d}{t} = d\sqrt{\frac{g}{2h}} = 11.9 \text{ m/s}$$

D'altra parte, per il moto del vino all'interno della botte possiamo utilizzare l'equazione di Bernoulli tra le altezze s e h e scrivere

$$P_s + \rho g s + \frac{1}{2}\rho v_s^2 = P_0 + \rho g h + \frac{1}{2}\rho v_0^2$$

dato che all'uscita la pressione è pari a quella atmosferica P_0. Supponendo poi che la velocità del vino alla quota s sia trascurabile, si ricava

$$P_s = P_0 - \rho g (s-h) + \frac{1}{2}\rho v_0^2 = P_0 + 1.89 \cdot 10^4 \text{ Pa} = 1.20 \cdot 10^5 \text{ Pa} = 1.19 \text{ atm}$$

Il fatto che la pressione nella botte sia maggiore della pressione atmosferica può essere determinato dai gas che vengono prodotti dalla fermentazione del vino.