

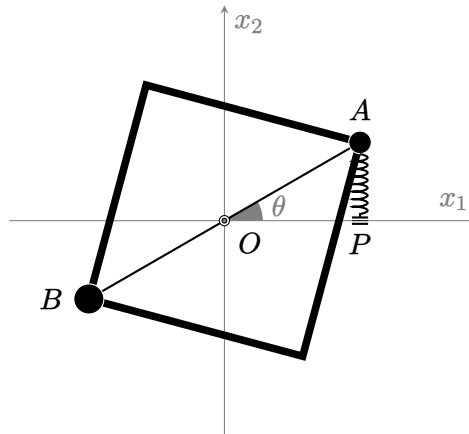
## ESAME DI MECCANICA RAZIONALE

CORSO DI LAUREA IN ARCHITETTURA – INGEGNERIA  
ALMA MATER – UNIVERSITÀ DI BOLOGNA

2 Settembre 2025

ISTRUZIONI. Il tempo a disposizione per la risoluzione è di 120 minuti. Risposte non giustificate non verranno conteggiate.

In un piano verticale è dato un riferimento cartesiano come in figura. Un sistema è costituito da un quadrato, composto da quattro aste omogenee, ciascuna di massa  $m$  e lunghezza  $\sqrt{2}\ell$ . Una quinta asta, di massa trascurabile, collega due vertici opposti del quadrato,  $A$  e  $B$ , passando per l'origine  $O$  del riferimento, dove un giunto permette la rotazione ideale del quadrato attorno al suo centro, vincolando il quadrato a rimanere nel piano. In  $A$  è inoltre saldata una massa  $m$ , mentre in  $B$  è data una massa  $3m$ . La massa in  $A$  è collegata, per mezzo di una molla ideale di costante elastica  $k > 0$ , ad un carrello  $P$ , che è libero di scorrere sull'intero asse delle ascisse senza attrito ed è tale da mantenere la molla sempre verticale.



Utilizzando l'angolo  $\theta$  che il segmento  $\overline{OA}$  forma con l'asse orizzontale (indicato in figura) come parametro lagrangiano, si risponda alle seguenti domande.

- A Si calcoli la posizione del centro di massa del sistema.
- B Si calcolino le configurazioni di equilibrio del sistema in funzione del parametro

$$\eta = \frac{mg}{k\ell}$$

e si dica se esse sono stabili o instabili.

- C Si calcoli il momento di inerzia del sistema rispetto all'asse perpendicolare al piano e passante per  $O$ .
- D Si calcoli il momento torcente totale delle forze attive rispetto ad  $O$  in funzione del parametro lagrangiano  $\theta$ .

SOLUZIONE

- A** Osserviamo anzitutto che la diagonale del quadrato ha lunghezza  $2\ell$ , per cui  $\|\vec{OA}\| = \|\vec{OB}\| = \ell$ . La massa totale del sistema è pari a  $8m$ . I punti materiali in  $A$  and  $B$ , sono individuati dai vettori

$$\vec{OA} = \ell \cos \theta \hat{i}_1 + \ell \sin \theta \hat{i}_2, \quad \vec{OB} = -\vec{OA}.$$

Per motivi di simmetria, il centro di massa del quadrato  $G_q$  è nel centro del riferimento, ovvero  $G_q \equiv O$ . abbiamo così che il centro di massa  $G$  del sistema è individuato da

$$\vec{OG} = \frac{m\vec{OA} - 3m\vec{OA} + 4m\vec{OG}_q}{8m} = -\frac{1}{4}\vec{OA} = -\frac{\ell \cos \theta}{4}\hat{i}_1 - \frac{\ell \sin \theta}{4}\hat{i}_2.$$

- B** L'energia potenziale può scriversi come

$$V(\theta) = -2mg\ell \sin \theta + \frac{1}{2}k\ell^2 \sin^2 \theta.$$

Le configurazioni di equilibrio sono date da

$$V'(\theta) = 0 \Rightarrow -2mg\ell \cos \theta + k\ell^2 \sin \theta \cos \theta = k\ell^2 \cos \theta (\sin \theta - 2\eta) = 0.$$

L'equazione ammette come soluzioni  $\theta_{\pm} = \pm \frac{\pi}{2}$  e, se  $\eta \in [0, 1/2)$ ,  $\theta_1 = \arcsin(2\eta)$ ,  $\theta_2 = \pi + \arcsin(2\eta)$ . Per valutare la stabilità di queste soluzioni, consideriamo

$$\begin{aligned} V''(\theta) &= 2mg\ell \sin \theta + k\ell^2 \cos^2 \theta - k\ell^2 \sin^2 \theta \\ &= 2mg\ell \sin \theta + k\ell^2 - 2k\ell^2 \sin^2 \theta = k\ell^2 (2\eta \sin \theta + 1 - 2\sin^2 \theta). \end{aligned}$$

Si ha che  $V''(\theta_+) = k\ell^2(2\eta - 1)$  per cui  $\theta_+$  è punto di equilibrio stabile per  $\eta > 1/2$ , instabile diversamente;  $V''(\theta_-) = -k\ell^2(2\eta + 1)$ , per cui  $\theta_-$  è punto di equilibrio instabile sempre. Se  $\eta \in [0, 1/2)$  ha che  $V''(\theta_{1/2}) = k\ell^2(1 - 4\eta^2) > 0$ , ovvero  $\theta_{1/2}$  sono punti di equilibrio stabile quando esistono.

- C** Il momento di inerzia di un'asta omogenea di lunghezza  $\ell$  e massa  $m$  rispetto ad un asse ad essa ortogonale e passante per il suo centro è  $I_a = \frac{1}{12}m\ell^2$ . Il momento di ciascun lato del quadrato rispetto ad  $O$  può essere ottenuto utilizzando il teorema di Huygens–Steiner: detto  $G_a$  il centro dell'asta, esso è pari a  $I'_a = I_a + md^2(G_a, O) = I_a + \frac{1}{2}m\ell^2$  (essendo  $d(G_a, O) = \frac{1}{\sqrt{2}}\ell$ ). Aggiungendo quindi il contributo delle masse in  $A$  e in  $B$ , e considerando il fatto che vi sono 4 aste che forniscono uguale contributo, il momento di inerzia cercato è

$$I_O = 4 \left( \frac{1}{12}m(\sqrt{2}\ell)^2 + \frac{1}{2}m\ell^2 \right) + 3m\ell^2 + m\ell^2 = \frac{20}{3}m\ell^2.$$

- D** Le forze attive sono la forza peso e quella elastica. La prima può considerarsi globalmente applicata in  $G$  e pari a  $\vec{F}_g = -8mg\hat{i}_2$ , mentre la seconda è pari a  $\vec{F}_{el} = -k\ell \sin \theta \hat{i}_2$  ed è applicata in  $A$ . Abbiamo così che

$$\vec{\tau}_O^{(att)} = \vec{OG} \wedge \vec{F}_g + \vec{OA} \wedge \vec{F}_{el} = (2mg - k\ell \sin \theta) \vec{OA} \wedge \hat{i}_2 = k\ell^2 (2\eta - \sin \theta) \cos \theta \hat{i}_3.$$