

Fisica

Tutela e Benessere Animale 2026

Prof. Francesco de Pasquale

5/11/2026 - Lezione 5

Perché l'Aria Frena i Corpi?

Quando un corpo si muove nell'aria, il fluido esercita su di esso una **forza di resistenza aerodinamica** che si oppone al moto. Questa forza non è costante: cresce con il quadrato della velocità. Più veloce è il corpo, maggiore è la resistenza che incontra. Questo principio è fondamentale per comprendere la caduta libera, il volo degli uccelli e persino la fisiologia respiratoria.



Forza Resistenza Aerodinamica

Equazione fondamentale

$$F_{AERO} = \frac{1}{2}\rho A c v^2$$

- ρ — Densità dell'aria

  Circa **1 kg/m³** in condizioni standard.

- A — Superficie del sistema

  L'area frontale esposta al flusso d'aria.

- c — Fattore di forma

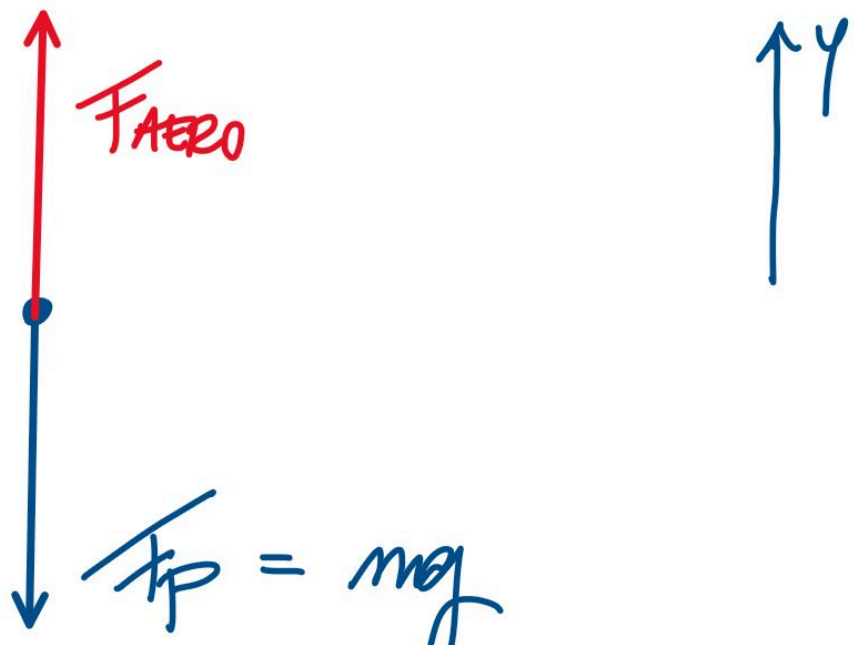
  Dipende dalla geometria del corpo.

- v — Velocità del sistema

  La velocità relativa rispetto all'aria.

Forza di Resistenza Aerodinamica

$$F_{AERO} = \frac{1}{2} \rho c A v^2$$



$$F_y = -mg + \frac{1}{2} \rho c A v^2 = ma$$

$$v_{LIMITE} \Rightarrow a = 0$$

$$-mg + \frac{1}{2} \rho A c v_{LIM}^2 = 0$$

$$v_{LIM}^2 = mg\, 2\, \frac{1}{\rho A c}$$

$$v_{LIM} = \sqrt{\frac{2mg}{\rho A c}}$$

Caso I: $\begin{cases} m = 80\,kg \\ \rho = 1\,kg/m^3 \\ A = (0{,}40 \cdot 1{,}80) = 0{,}72\,m^2 \\ c = 1 \end{cases}$

$$v_{lim} = 47{,}2\ m/s = 168{,}12\ km/h$$

↳ Senza paracadute $A = 0{,}72\,m^2$

Ora consideriamo un paracadute

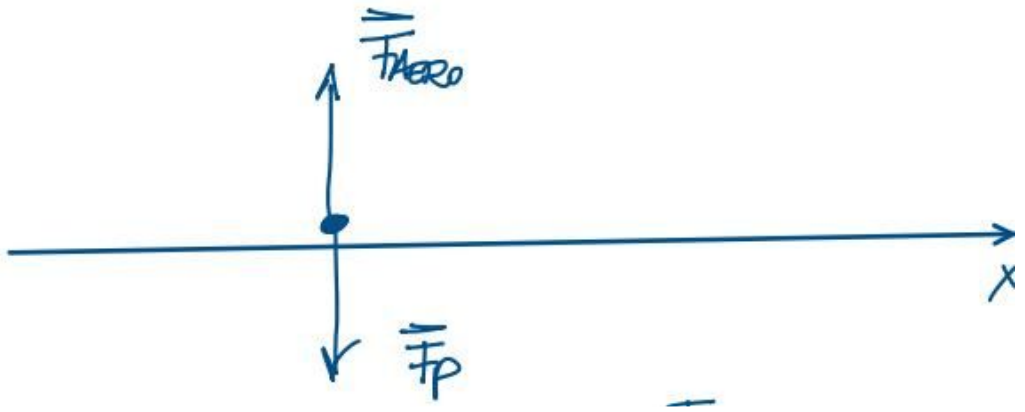
con $A = 40\,m^2$

$$v_{lim,\,PAR.} = 6{,}26\ m/s = 22{,}5\ km/h$$

↓

Velocità sicura

Forza Resistenza Aerodinamica



Equazione del moto

$$\vec{F} = m\vec{a} = \vec{F}_P + \vec{F}_{AERO}$$

Scomponendo nelle componenti:

$$\begin{cases} F_x = 0 \\ F_y = -F_P + F_{AERO} = ma_y \end{cases}$$

Il peso $\vec{F}_P$ agisce verso il basso, mentre la resistenza aerodinamica $\vec{F}_{AERO}$ agisce verso l'alto, opponendosi alla caduta.

Velocità limite

La **velocità limite** si raggiunge quando la forza aerodinamica bilancia esattamente il peso: l'accelerazione diventa zero e il corpo cade a velocità costante. Imponiamo $F_y = 0$:

$$0 = -F_P + F_{AERO} = -mg + \frac{1}{2}\rho A c v_{lim}^2$$

$$\frac{1}{2}\rho A c v_{lim}^2 = mg$$

$$V_{lim} = \sqrt{\frac{2mg}{\rho A c}}$$

Questa formula è valida per qualsiasi corpo in caduta verticale in un fluido. È applicabile anche in fisiologia per descrivere il moto di particelle nei fluidi biologici.

Esempio: Caduta di un Essere Umano

Dati del problema

$m = 85\ \text{kg}$

Massa corporea

$g = 9{,}81\ \text{m/s}^2$

Accelerazione di gravità

$\rho = 1\ \text{kg/m}^3$

Densità aria

$A = 0{,}72\ \text{m}^2$

Superficie (1,80 × 0,40 m)

Risultati al variare di c

Con **c = 0,04** (corpo aerodinamico, posizione a testa in giù):

$$V_{lim} = 240{,}63\ \text{m/s} = \mathbf{866}\ \text{km/h}$$

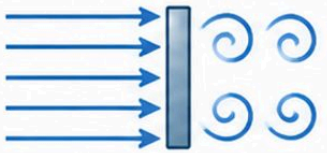
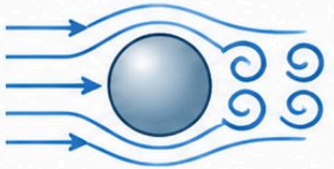
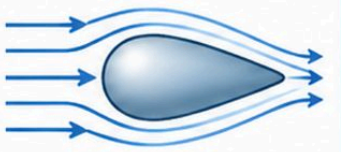
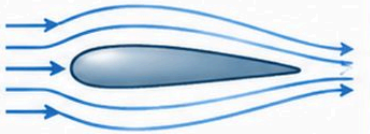
Con **c = 1** (corpo piatto, massima resistenza):

$$V_{lim} \approx \mathbf{173}\ \text{km/h}$$

Il fattore di forma c cambia radicalmente la velocità limite!

Il Fattore di Forma c

Il fattore di forma descrive quanto un corpo è aerodinamico. Dipende esclusivamente dalla **geometria** del corpo, non dalla sua massa o velocità. Ecco tre esempi fondamentali con i rispettivi valori:

Geometria	**Lastra piatta** (perpendicolare al flusso)	**Cilindro** (asse ⊥ al flusso)	**Sfera**	**Goccia**	**Profilo alare** (allineato al flusso)
Forma e linee di flusso					
Coefficiente di resistenza c	**c ≈ 1,05**	**c ≈ 1,2**	**c ≈ 0,44**	**c ≈ 0,04**	**c ≈ 0,02**
Osservazioni	Massima resistenza. Superficie massima al flusso.	Resistenza elevata a causa del distacco del flusso.	Resistenza intermedia. Forma simmetrica ma non ottimizzata.	Resistenza molto bassa. Forma ottimizzata (conica e arrotondata).	Resistenza minima. Forma progettata per ridurre la resistenza.

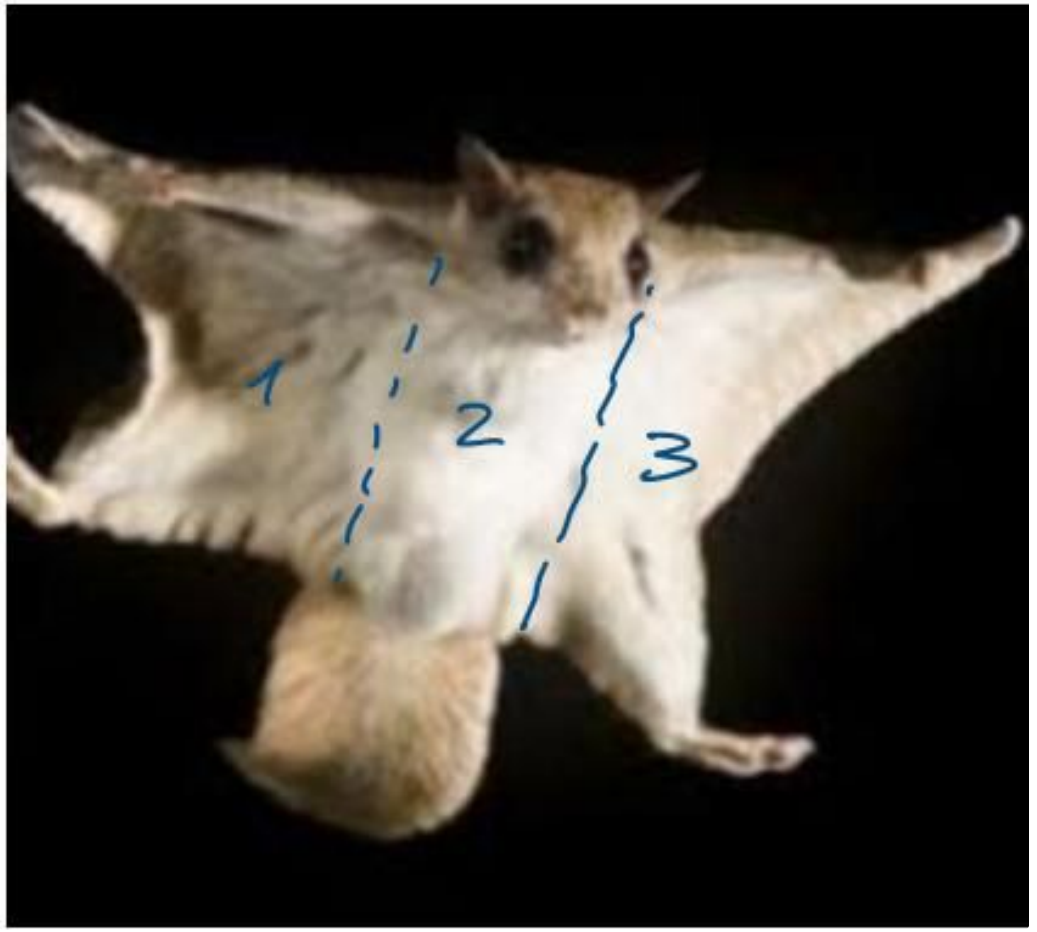
Maggiore resistenza (c più grande) ← → **Minore resistenza** (c più piccolo)



Il Fattore di Forma nel Mondo Animale

Nel mondo animale, il fattore di forma c non è fisso: gli animali possono **modificare attivamente la propria geometria corporea** per adattarsi alle esigenze del momento. Un falco pellegrino in picchiata assume una forma a goccia con $c \approx 0{,}04$, raggiungendo oltre 300 km/h. Lo stesso uccello in planata apre le ali, aumentando A e c, riducendo drasticamente la velocità.

Lo Scoiattolo Volante: Triplicare la Superficie



Scoiattolo volante (*Pteromys volans*)

Lo scoiattolo volante è un esempio straordinario di adattamento aerodinamico. Aprendo la membrana laterale (**patagio**), l'animale **triplica la propria superficie esposta**:

$$A' = 3A$$

Questo aumento di superficie incrementa enormemente F_{AERO}, abbassando la velocità limite e permettendo planate sicure tra gli alberi. Un meccanismo evolutivo che sfrutta direttamente la fisica della resistenza aerodinamica.

Adattamenti Aerodinamici nel Regno Animale



Scoiattolo volante

Triplica la superficie con il patagio: $A' = 3A$, abbassando la velocità di planata.



Aquila in planata

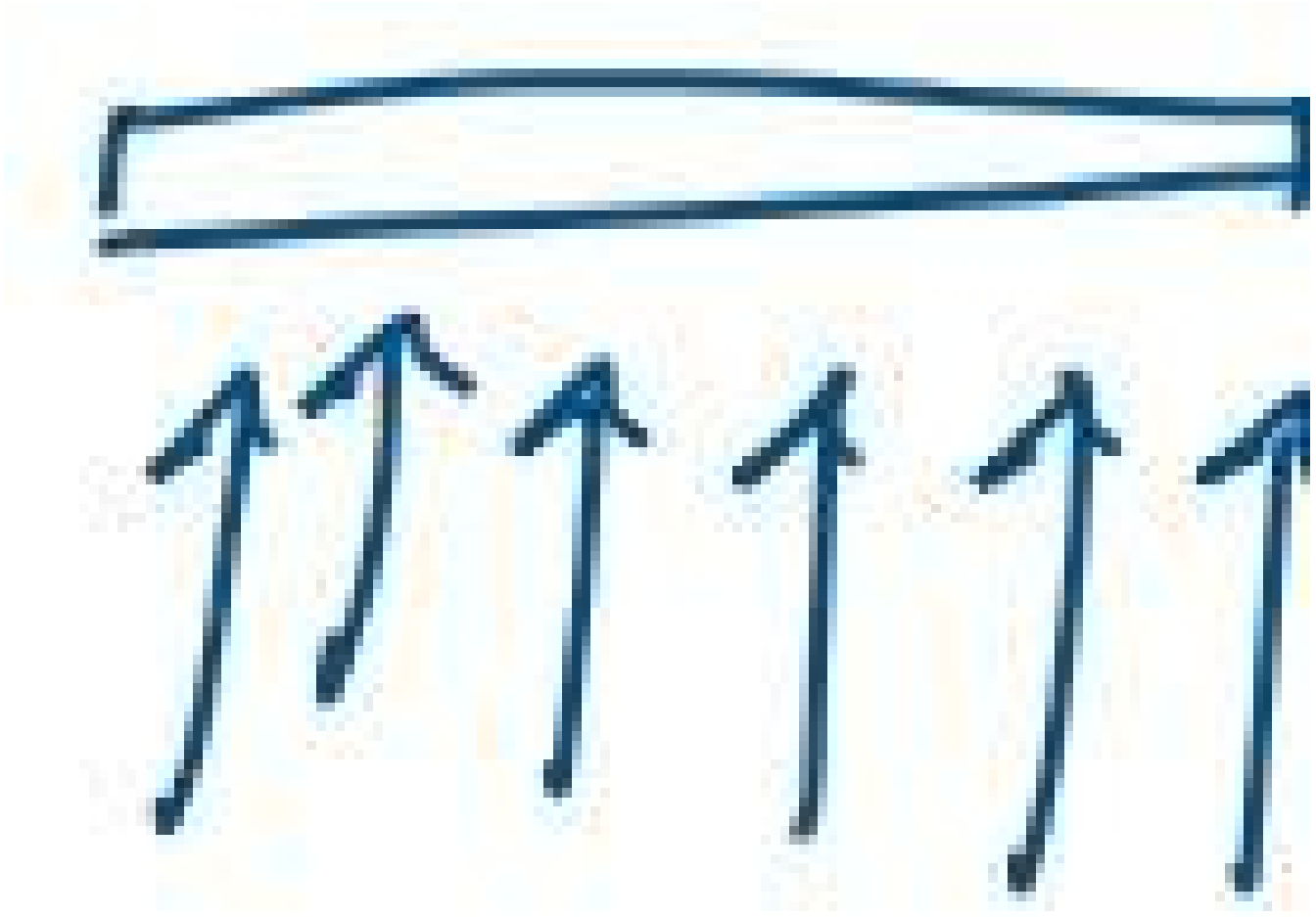
Ali aperte: grande A e $c = 1{,}05$ per planate lente e controllate.



Falco in picchiata

Ali chiuse: piccola A e $c = 0{,}04$ per velocità massima in picchiata.

Esercizio: Velocità Limite dell'Aquila



Calcolare la velocità limite (V_{lim}) in **picchiata** e in **planata** per un'aquila con:

Massa

m = 5 kg

Densità aria

ρ = 1,05 kg/m³

Picchiata

c = 0,1 ; A_1 = 0,12 m²

Planata

c = 1,05 ; A_2 = 1,08 m²

Aquila in Picchiata

Calcolo di V_{lim} in picchiata

$$V_{lim} = \sqrt{\frac{2mg}{\rho\, c\, A}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 5 \cdot 9{,}81}{1{,}05 \cdot 0{,}1 \cdot 0{,}12}}$$

$$V_{lim} = 88{,}24\ \mathrm{m/s} \approx \mathbf{320}\ \mathrm{km/h}$$

Verifica dimensionale

$$\sqrt{\frac{\mathrm{kg} \cdot \mathrm{m/s}^2}{\frac{\mathrm{kg}}{\mathrm{m}^3} \cdot \mathrm{m}^2}} = \sqrt{\frac{\mathrm{m}^2}{\mathrm{s}^2}} = \mathrm{m/s} \quad \checkmark$$

Interpretazione biologica

A **~320 km/h**, l'aquila in picchiata è uno dei vertebrati più veloci del pianeta. La forma aerodinamica con $c = 0{,}1$ e la piccola superficie alare $A_1 = 0{,}12\ \mathrm{m}^2$ minimizzano la resistenza, permettendo questa velocità straordinaria.

Aquila in Planata

Calcolo di V_{lim} in planata

$$V_{lim} = \sqrt{\frac{2 \cdot 5 \cdot 9{,}81}{1{,}05 \cdot 1{,}05 \cdot 1{,}08}}$$

$$V_{lim} = 9{,}07 \text{ m/s} \approx \mathbf{33{,}6} \text{ km/h}$$

Interpretazione biologica

In planata, l'aquila apre completamente le ali: $c = 1{,}05$ e $A_2 = 1{,}08 \text{ m}^2$. La resistenza aerodinamica aumenta enormemente, abbassando la velocità limite a soli **~30 km/h**. Questo permette voli lenti e precisi durante la caccia o l'atterraggio.

Lo stesso animale può variare la propria velocità limite di un fattore 10 semplicemente modificando la postura delle ali!

Videdo falco pellegrino



YouTube

Skydiving Falcon | National Geographic

How fast can a peregrine falcon fly? One scientist aims to find out by skydiving along with the birds. ➡ Subscribe: http://bit.ly/NatGeoSubscribe About National...

Confronto:
Picchiata vs Planata

320

km/h in picchiata

Ali chiuse, c = 0,1, A = 0,12 m²

34

km/h in planata

Ali aperte, c = 1,05, A = 1,08 m²

10x

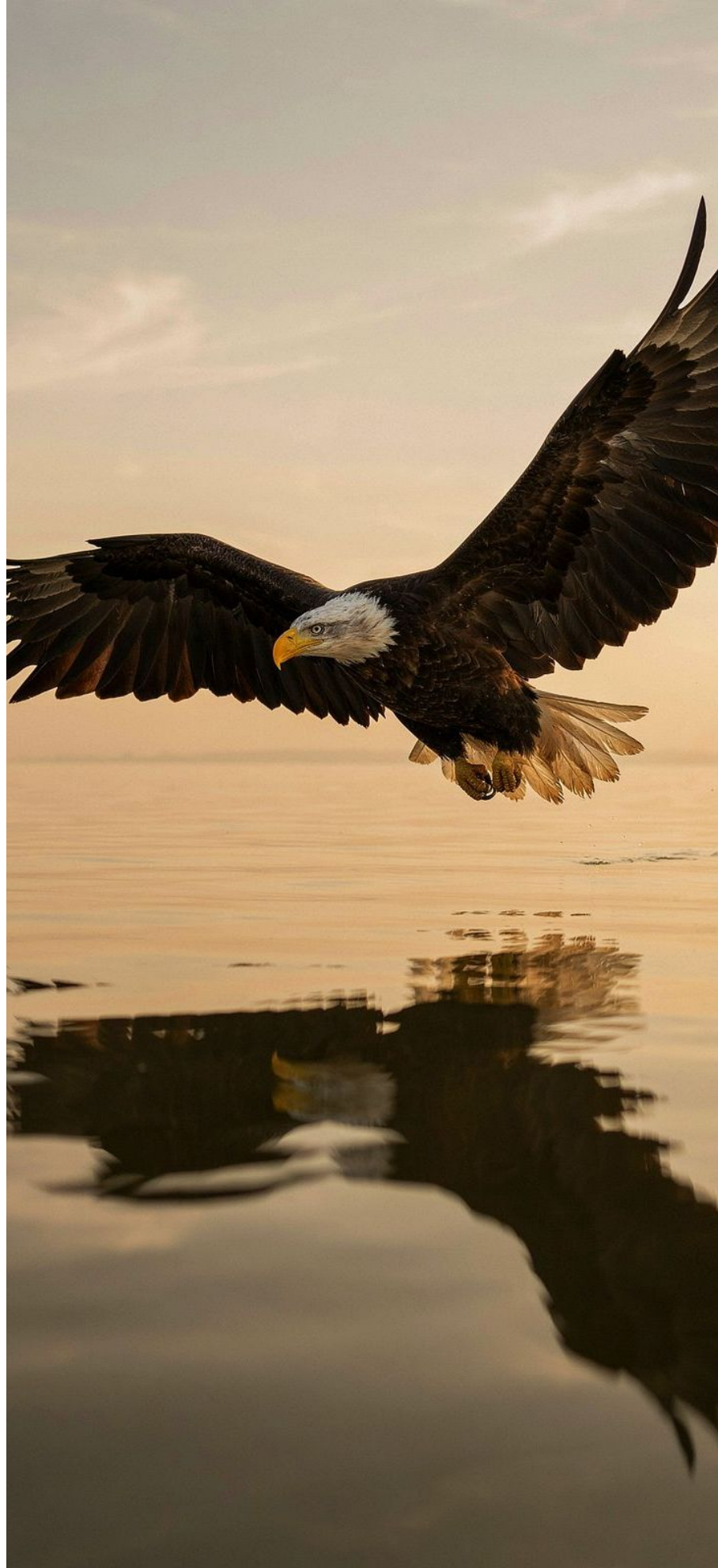
Fattore di variazione

Velocità limite modificata solo con la postura

9x

Variazione di superficie

Da 0,12 m² a 1,08 m² aprendo le ali



Momento di una forza:

$$\vec{M} = \vec{r} \times \vec{F}$$

↑ vettor

Prodotto vettoriale

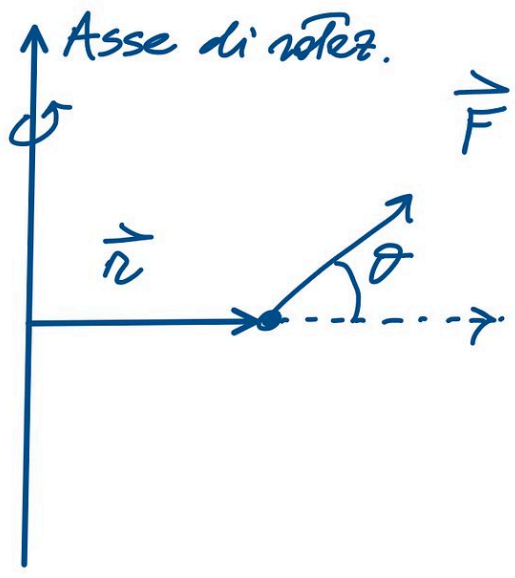
Momento di una forza

$\vec{M} =$ { Modulo, Direzione, Verso

$[\vec{M}] = N\,m$

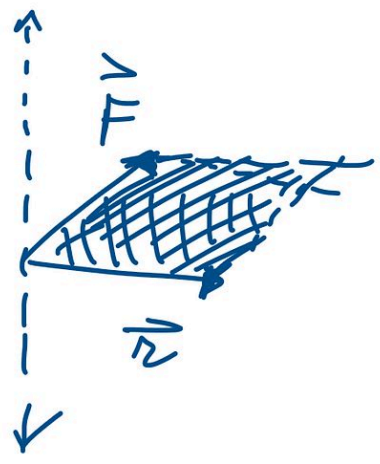
·) Modulo

$$|\vec{M}| = rF\sin\theta$$



$\vartheta \to \vec{r} \curvearrowright \vec{F}$

·) Direzione

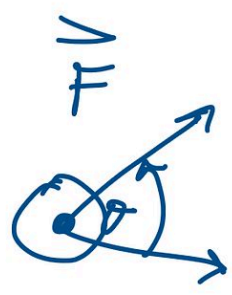


Direzione ⇓

⊥ al piano formato da $\vec{r}$ ed $\vec{F}$

·) Verso

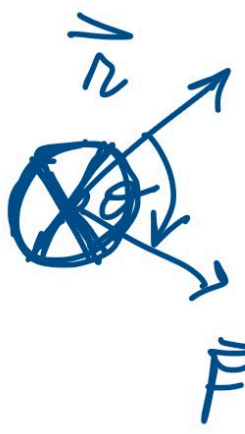
a) Positivo se $\vec{r}$ o $\vec{F}$ in senso antiorario



$\vec{r}$ o $\vec{F}$ in senso antiorario

$\vec{r}$ ⊙ $M > 0$ uscente dal piano

b) Negativo quando $\vec{r} \curvearrowright \vec{F}$ in senso orario

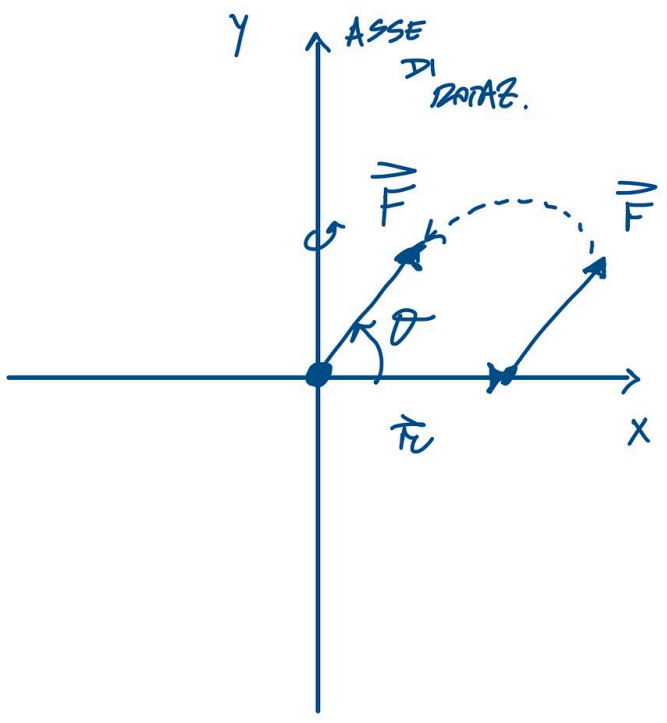


senso orario

$M < 0$ ⊗

⇓

Come calcolare il $\vec{M}$:

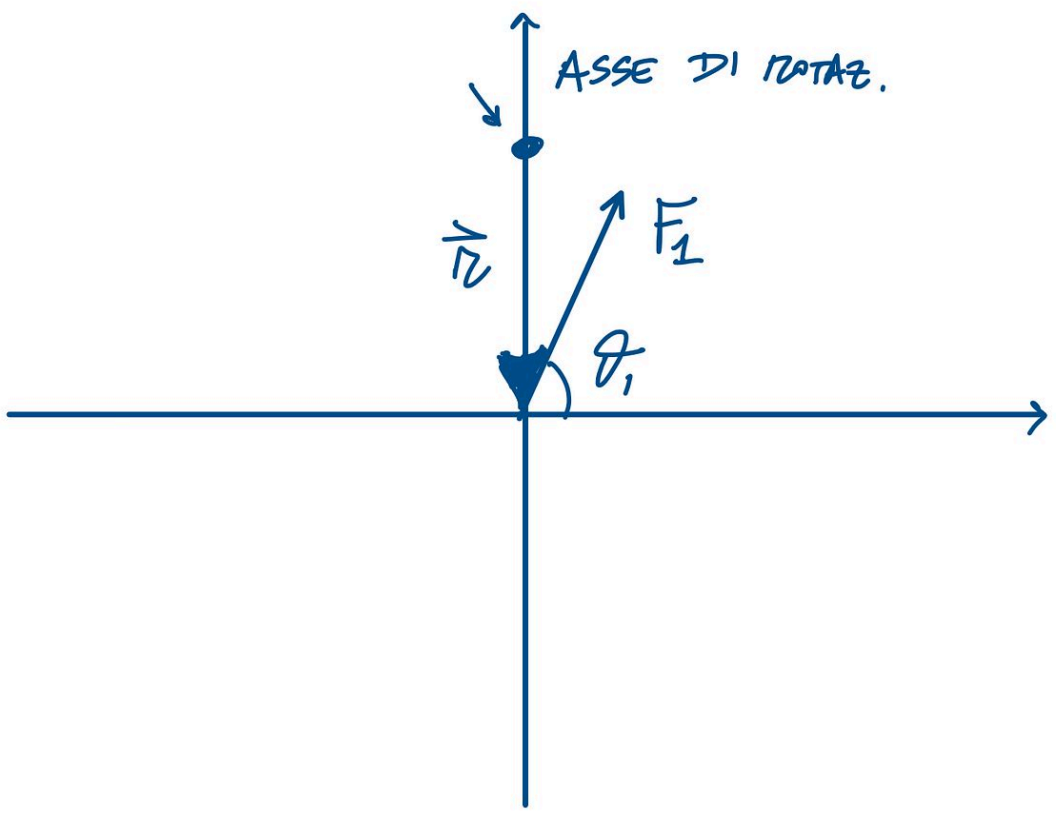


$\vec{M} = ?$

1) $\vec{r}$
2) $\vec{F}$ $\curvearrowright$ $\vec{r}$
$\vec{r}, \vec{F}$ applicati nello stesso PTO
3) ϑ $\vec{r}$ e $\vec{F}$
4) $\vec{r} \curvearrowright \vec{F}$ $\begin{cases} \text{s. antiorario} & M>0 \\ \text{" orario} & M<0 \end{cases}$

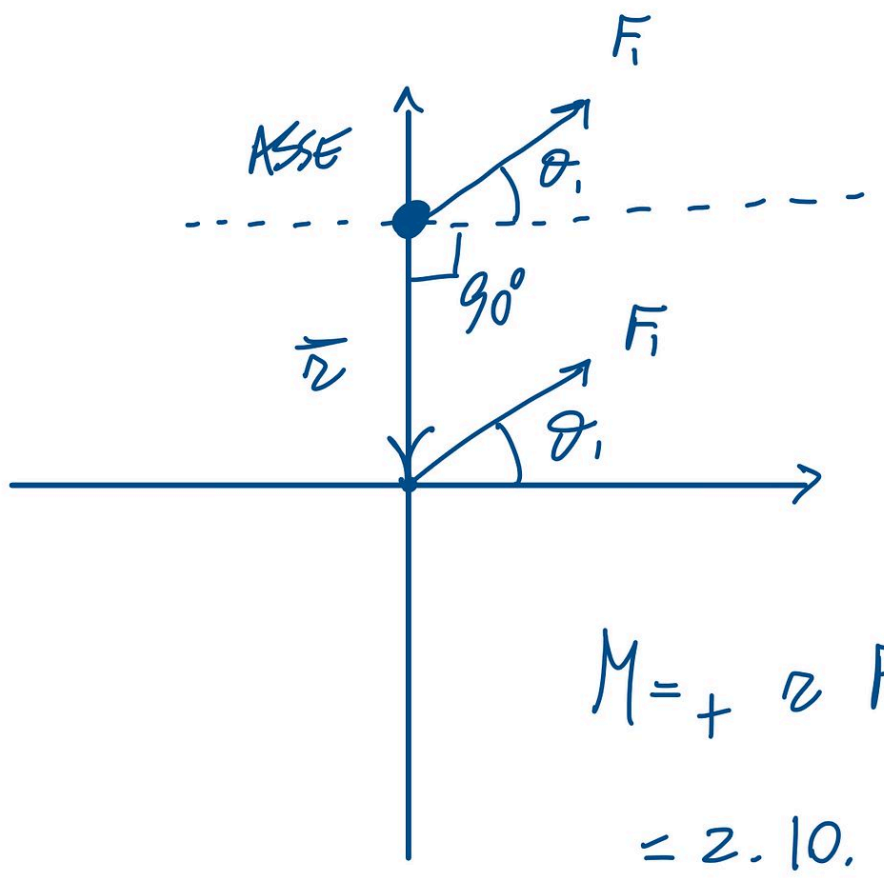
Esempio:

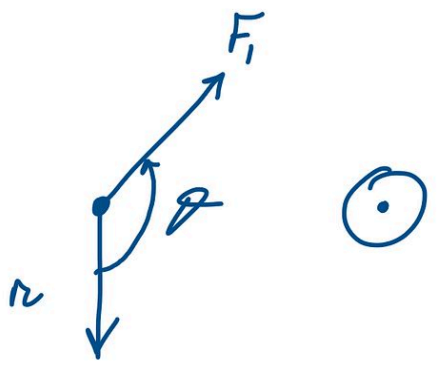
Calcolare $\vec{M}_1$:



$$\begin{cases} r = 2m \\ F_1 = 10N \\ \vartheta_1 = 30° \end{cases}$$

Modulo, Direz. e verso $\vec{M}_1$





$\vartheta = 90° + 30° = 120°$

$M = + r F_1 \sin\vartheta$

$= 2 . 10 . \sin 120$

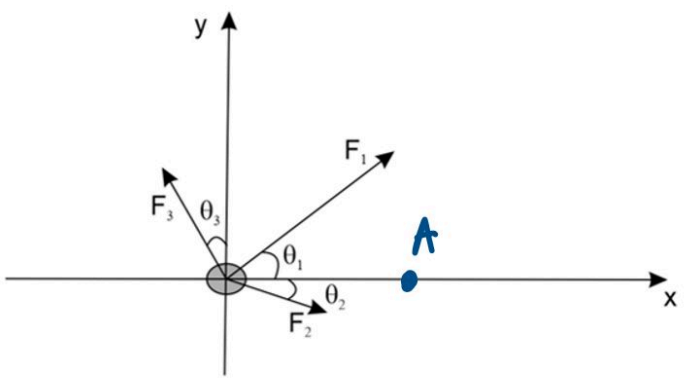
$r \wedge F_1$ senso antiorario

$$M = 17,32 \ Nm$$

Esercitazione

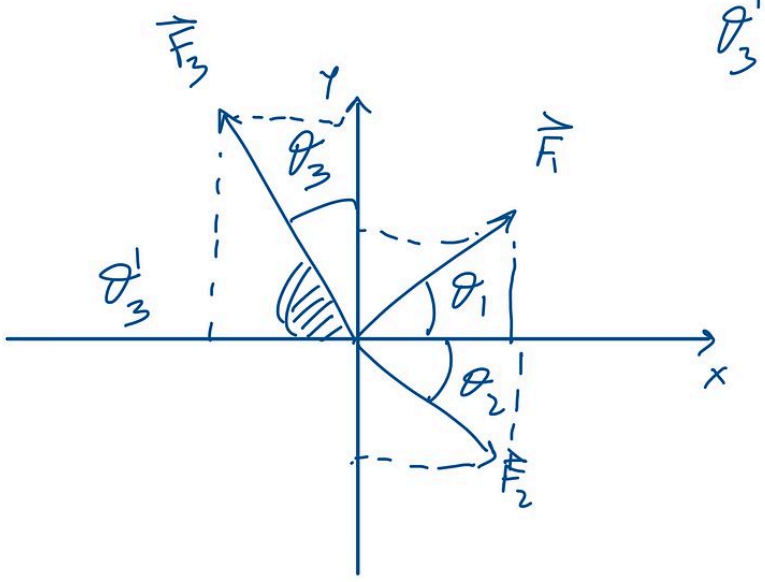
Un disco da hockey di massa m=0.32 kg scorre su una superficie orizzontale (priva di attrito) di una pista di ghiaccio. Esso è colpito simultaneamente da tre diverse mazze da hockey come mostrato in figura. La forza F_1 ha modulo 8.5 N, F_2 ha modulo 3.1 N e F_3 ha modulo 5.3 N. Gli angoli che le forze formano con l'asse x sono rispettivamente θ_1=45°, θ_2= 31° e θ_3=32°. Calcolare:

1. Il modulo della risultante delle forze agenti sul disco nel piano xy;
2. Modulo direzione e verso della sua accelerazione;
3. Il momento risultante di F_1 ed F_2 rispetto a un asse perp. al piano xy e posto a distanza di +2 m sull'asse x;
4. Se ora sul piano fosse presente attrito dinamico con μ_d = 0.04, calcolare di quanto varia l'accelerazione del disco.



Soluzione

1)



$\theta_3' = 90 - 32 = 58°$

$\theta_3' = 90 - 32 = 58°$

$$\begin{cases} F_x = F_1 \cos\theta_1 + F_2 \cos\theta_2 - F_3 \cos\theta_3' = 5{,}8591\ N \\ F_y = F_1 \sin\theta_1 - F_2 \sin\theta_2 + F_3 \sin\theta_3' = 8{,}50\ N \end{cases}$$

$$|\vec{F}| = \sqrt{F_x^2 + F_y^2} = 10{,}66\ N \simeq 11\ N$$

$$\boxed{|\vec{F}| = 11\ N \quad (2\ c.s.)}$$

$$\theta = \operatorname{arctg}\left(\frac{F_y}{F_x}\right) = 56{,}9° \simeq 57 \quad (2\ c.s.)$$

2) $\vec{F} = m\vec{a}$ $\quad F = ma$ $\quad a = \frac{F}{m} = \frac{10{,}66}{0{,}32} = 33{,}31\ m/s^2$

$a \simeq 33\ m/s^2$ (2 c.s.)

Del momento che $\vec{F}$ e $\vec{a}$ sono parallele $\Rightarrow \vec{a} \parallel \vec{F}$

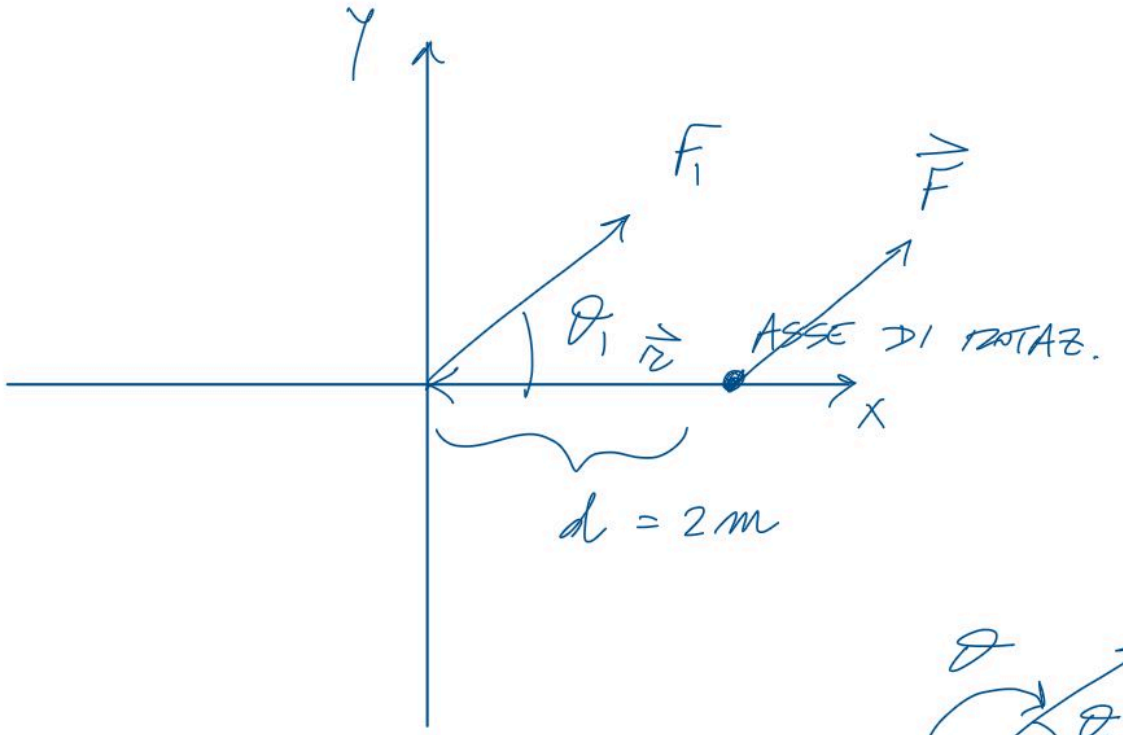
$\Downarrow$

Stesso angolo

$\vartheta = \arctg\left(\frac{F_y}{F_x}\right) = 56{,}9° \simeq 57°$

$\vartheta = 57°$ (2 c.s.)

3)

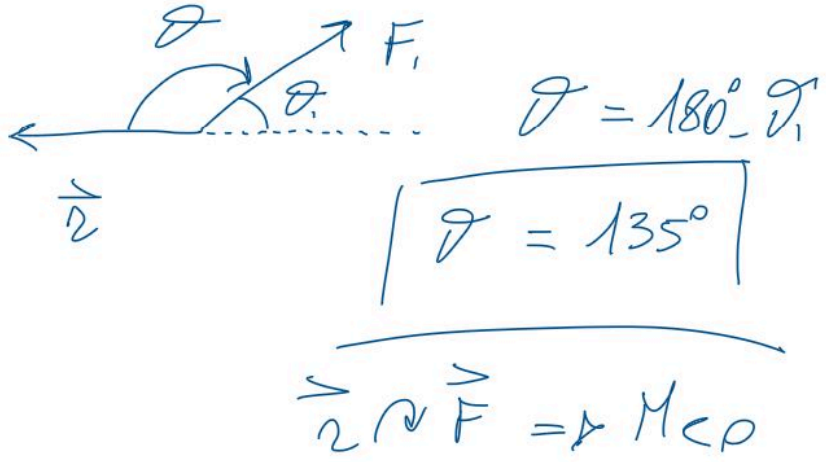


1 $\vec{r}$

2 F → $\vec{r}$

3 ϑ

4



$\vartheta = 180° - \vartheta_1$

$\boxed{\vartheta = 135°}$

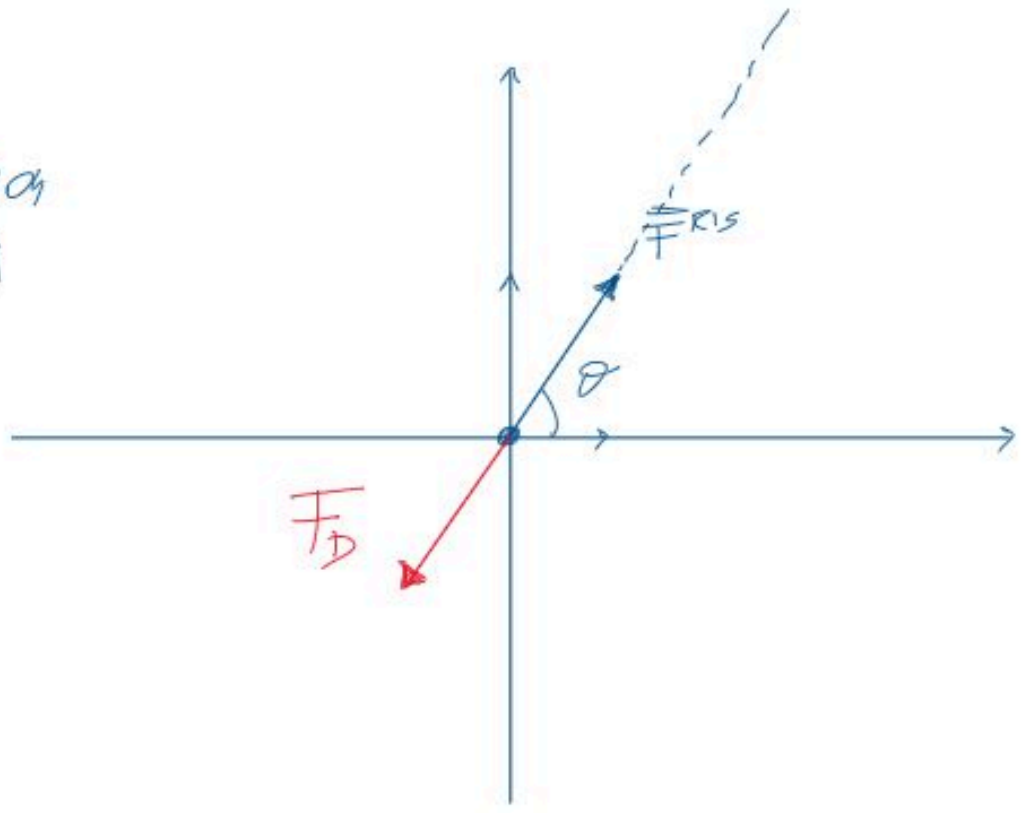
$\vec{r} \curvearrowright \vec{F} \Rightarrow M < 0$

$M = - 2 \cdot 8{,}5 \cdot \sin(135°)$

(X)

$\boxed{M_1 = - 12{,}021 \ Nm}$

4) $\mu_D = 0,04$



$\bar{a}' = ?$

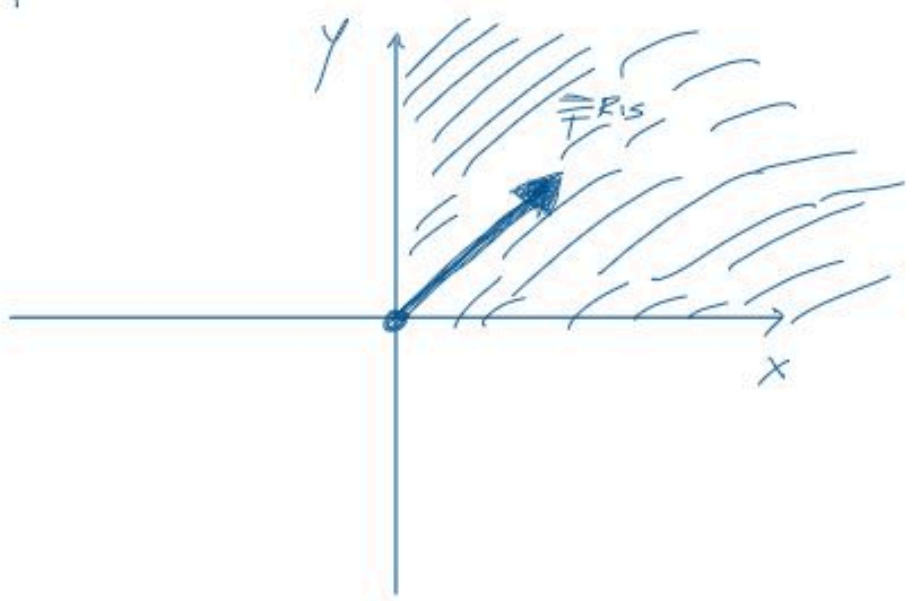
$$\bar{F}' = \underbrace{\bar{F}^{RIS} - \bar{F}_D}_{\downarrow} = m\bar{a}'$$

$$a' = \left(\frac{F^{RIS} - F_D^{?}}{m} \right)$$

$\uparrow$

$$F_D = -\mu_D N$$

$\uparrow$



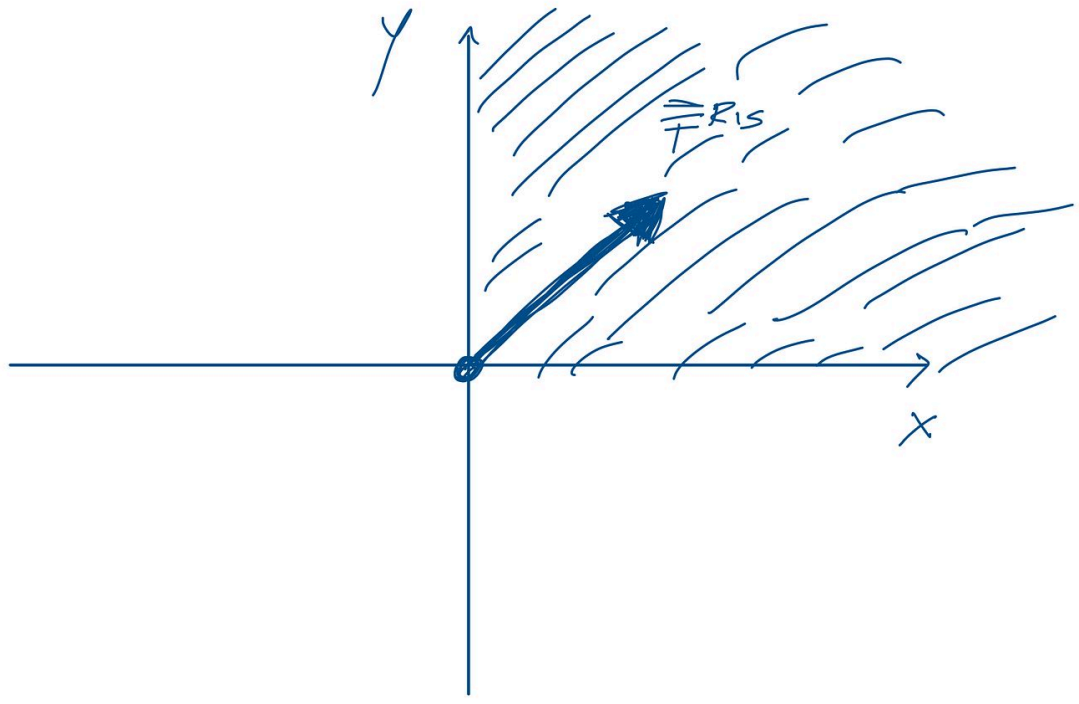
Perpendicolarmente alla sup. abbiamo:

$$-F_P + N = 0 \qquad \boxed{N = F_P}$$

$$F' = F^{RIS} - F_D = m a'$$

$$a' = \left(\frac{F^{RIS} - F_D^{?}}{m} \right)$$

$$F_D = -\mu_D N$$



Perpendicolarmente alla sup. abbiamo:

$$-F_P + N = 0 \qquad \boxed{N = F_P}$$

$$N = F_P = mg$$

$$F_D = \mu_D N = 0{,}04 \cdot 0{,}32 \cdot 9{,}81 = 0{,}1256\ N$$

$$a'_D = \frac{(10{,}66 - 0{,}1256)}{0{,}32} = 32{,}92\ m/s^2$$

Quanto varia l'accelerazione?

$$\Delta a = a - a' = 33{,}31 - 32{,}92 = 0{,}39\ m/s^2$$

$$\boxed{\Delta a = 0{,}39\ m/s^2 \quad (2\ c.s.)}$$

Riepilogo della Lezione

Forza di resistenza aerodinamica

La forza $F_{AERO} = \frac{1}{2}\rho A c v^2$ dipende dalla densità dell'aria (ρ), dall'area frontale (A), dal fattore di forma (c) e dal quadrato della velocità (v).

Velocità limite

Si raggiunge quando $F_{AERO} = P$ (peso), con accelerazione nulla. La formula è $V_{lim} = \sqrt{\frac{2mg}{\rho A c}}$.

Fattore di forma c

Dipende esclusivamente dalla **geometria** del corpo. Corpi più aerodinamici hanno un c più basso.

Adattamenti animali

Gli animali modificano attivamente il loro fattore di forma: lo scoiattolo volante **triplica la superficie**, il falco pellegrino **affusola il corpo** in picchiata.

Esercizio dell'aquila

In **picchiata** (A e c piccoli), $V_{lim} \approx 320\ \mathrm{km/h}$; in **planata** ($A$ e c grandi), $V_{lim} \approx 33.6\ \mathrm{km/h}$.

Domande di autovalutazione

Verifica la tua comprensione dei concetti chiave dell'aerodinamica.

1. Da quali grandezze dipende la forza di resistenza aerodinamica (F_{AERO}) e come varia se la velocità raddoppia?

2. Cosa significa che un corpo ha raggiunto la velocità limite (V_{lim})? Quali forze si bilanciano in quel momento?

3. Ricava la formula della velocità limite imponendo $F_y = 0$.

4. Perché una piuma e un sasso cadono in modo diverso nell'aria ma non nel vuoto?

5. Come cambia la velocità limite se aumenta l'area frontale (A) o il fattore di forma (c)? Perché l'aquila in picchiata raggiunge una V_{lim} molto maggiore che in planata?

6. Cosa descrive il fattore di forma (c) e da cosa NON dipende?