

Università degli Studi di Padova – Dipartimento di Ingegneria Industriale

Corso di Laurea in Ingegneria Aerospaziale

***Relazione per la prova finale
«Aspetti strutturali del rotore di una
turbina eolica ad asse orizzontale»***

Tutor universitario: *Prof. Ugo Galvanetto*

Laureando: *Siviero Roberto*

Padova, 14/11/2023

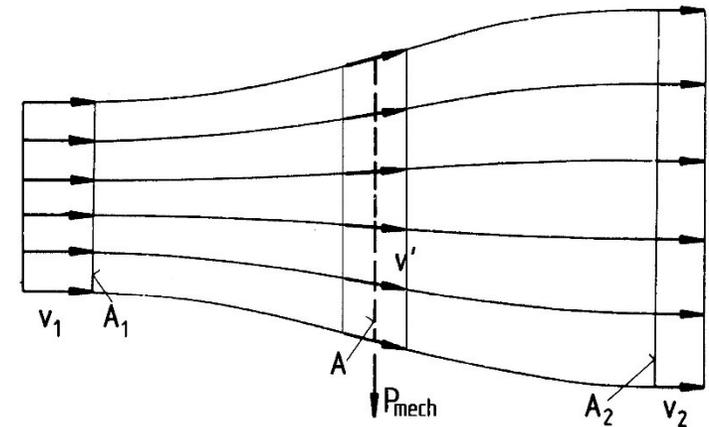
- E' la macchina fluidodinamica che converte l'energia cinetica di un flusso d'aria in energia meccanica all'asse.
- HAWT e VAWT.
- La concentrazione energetica del flusso che la investe è bassa ed è una macchina «aperta».



- Ipotesi:
 1. Stazionarietà
 2. Non viscosità del flusso
 3. Caso monodimensionale
 4. Fenomeni dissipativi trascurati
 5. Componenti cinematiche e dinamiche radiali e tangenziali trascurate
- L'energia meccanica viene estratta dal flusso per mezzo di una riduzione della sua energia cinetica

$$\begin{cases} E = \frac{1}{2}mv^2 \\ \dot{m} = \rho vA \end{cases}$$

$$P = \frac{1}{2}\dot{m}(v_1^2 - v_2^2)$$



- La velocità del flusso uscente non può essere nulla.
- C_p non rappresenta una misura di efficienza esatta.
- Il valore ideale è pari a $v_2/v_1 = 1/3$, da cui $C_p = 0,593$. Quindi:
 1. L'efficienza massima è circa del 60%
 2. La potenza estraibile va col cubo della velocità del vento e col quadrato del diametro del rotore

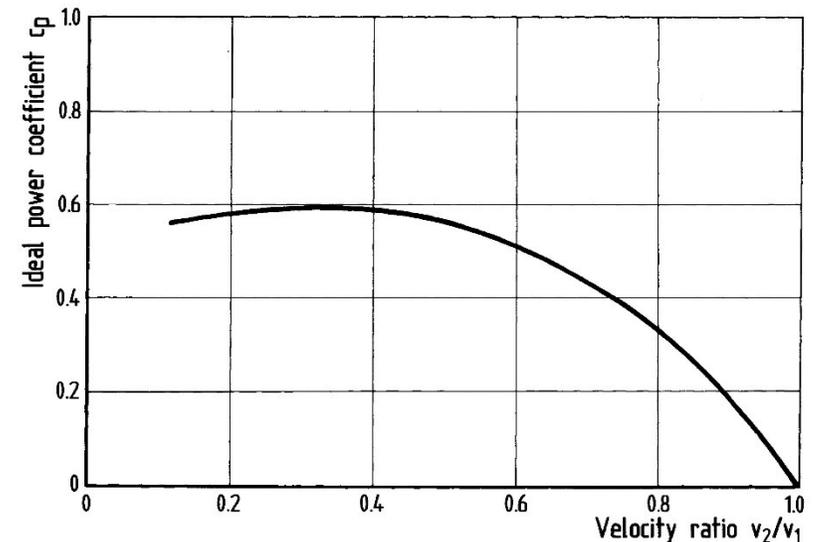
$$P = Fv' = \dot{m}(v_2 - v_1)v'$$

↓

$$v' = \frac{1}{2} (v_1 - v_2)$$

$$C_p = \frac{P}{P_0}$$

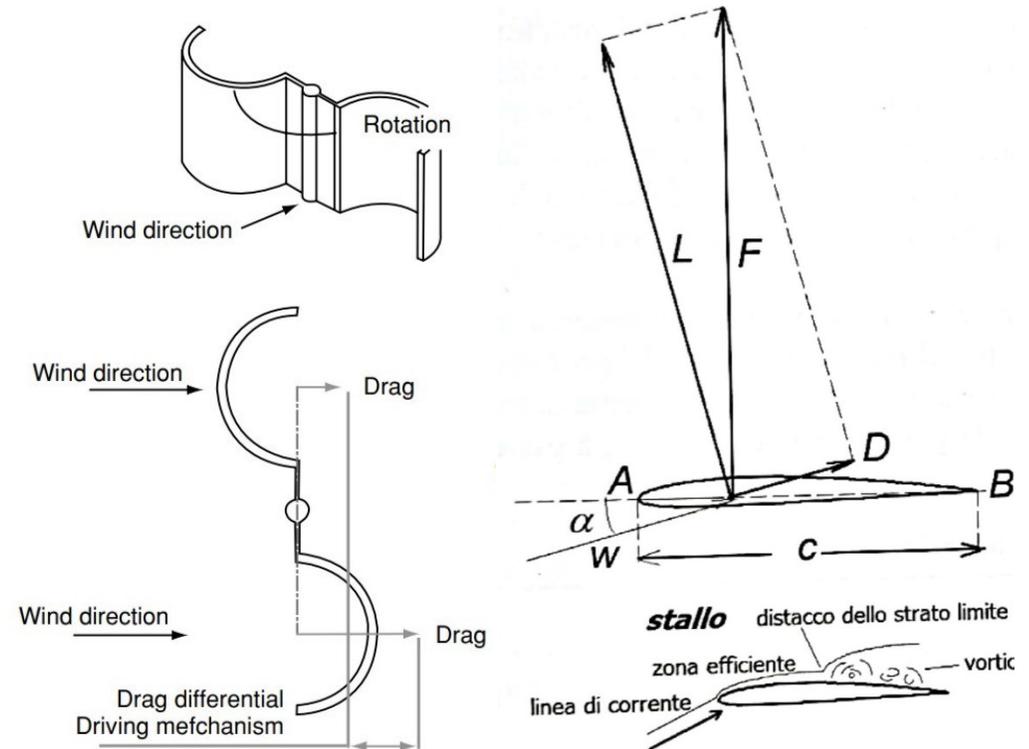
$$P_0 = \frac{1}{2} \rho v_1^3 A'$$



- Le macchine ad attrito sfruttano l'attrito aerodinamico. L'efficienza massima è circa del 20%.
- Le macchine a portanza sfruttano la portanza generata dalle pale. Sono composte da sezioni aerodinamiche.
- I profili (NACA 4-5 cifre, LF, FFA, RISO) sono studiati espressamente per:
 1. Particolari esigenze strutturali.
 2. Vicinanza al suolo.

$$P = \frac{1}{2} C_D \rho (v_w - v_r)^2 A v_r$$

$$C_{p_{max}} = \frac{4}{27} C_D$$

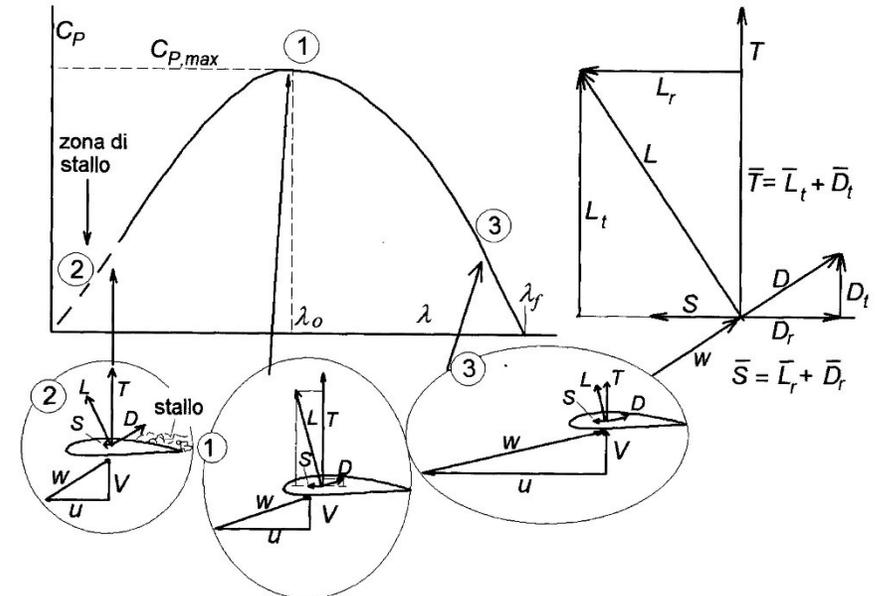
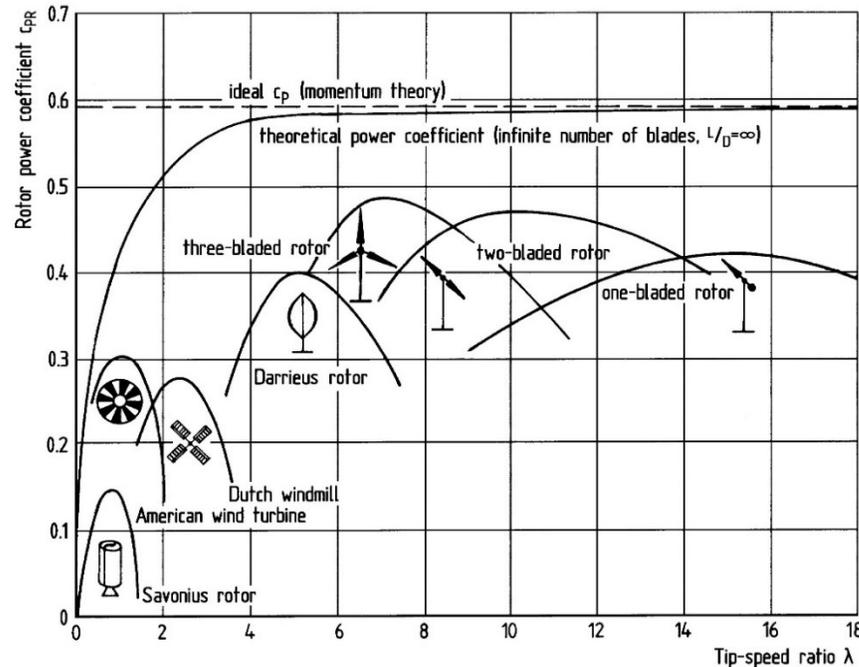


- Rapporto di velocità periferica λ
- Coefficiente di coppia C_m
- Solidità σ

$$\lambda = \frac{u}{v_w} = \frac{\omega r}{v_w}$$

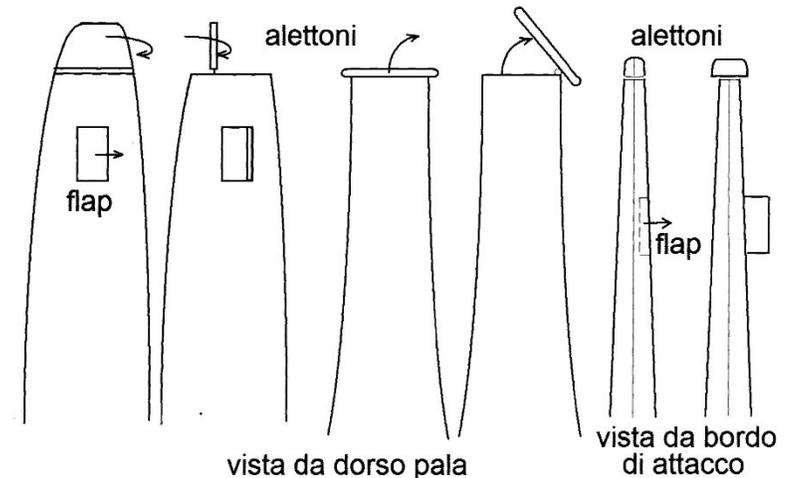
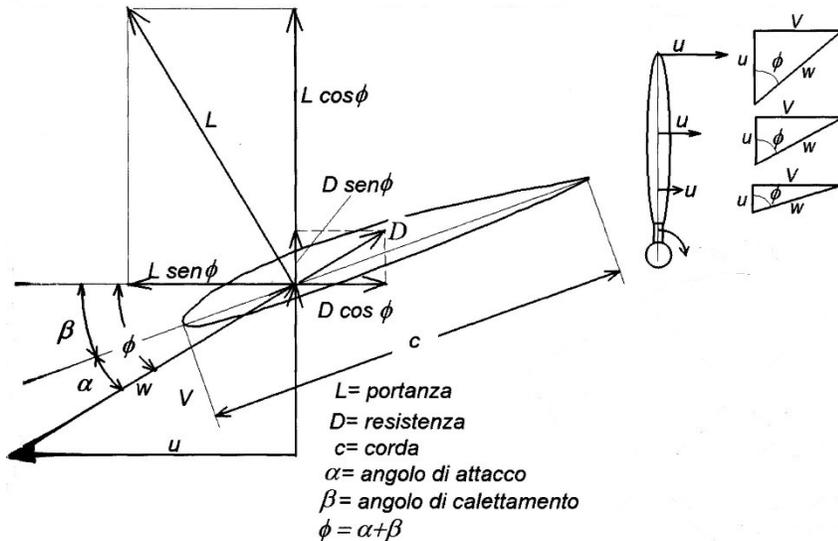
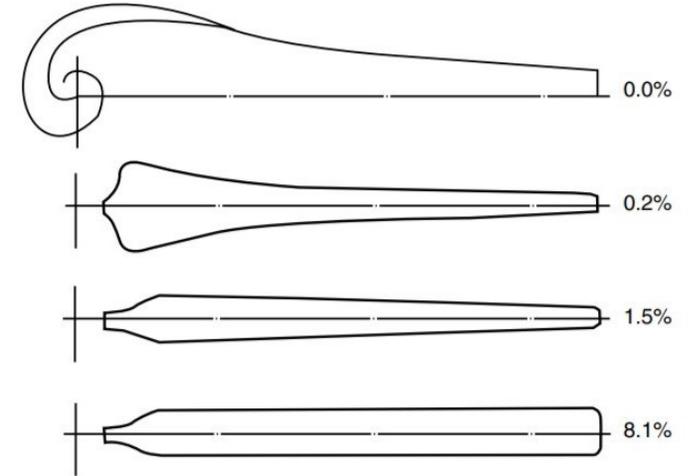
$$C_m = \frac{C_p}{\lambda}$$

$$\sigma = \frac{\text{superficie delle pale totale}}{\text{area del disco battuto}}$$

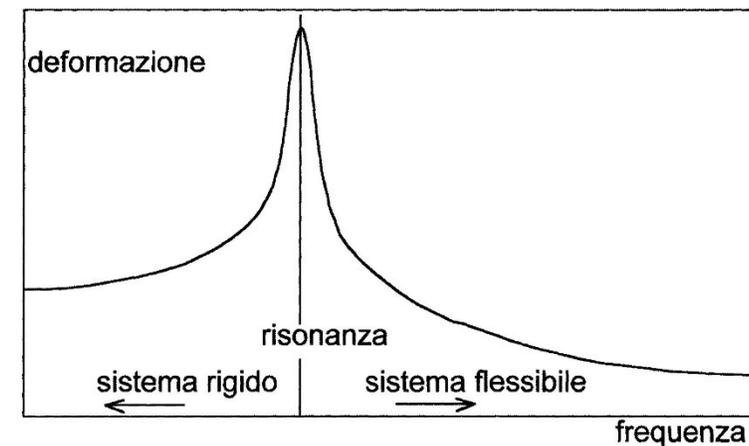
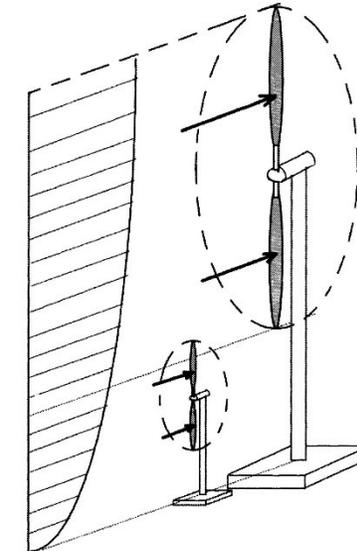
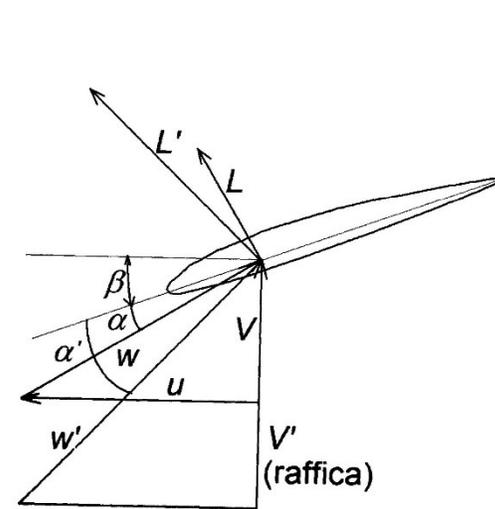


- Deve conciliare esigenze strutturali, aerodinamiche, costruttive ed economiche
- Svergolamento
- Dispositivi ausiliari e passo variabile

$$c = \frac{2\pi r}{n} \frac{8}{9C_L} \frac{v}{\lambda v_r}$$



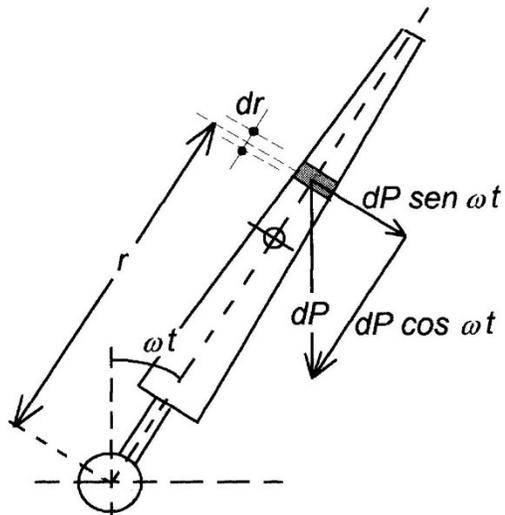
- Classificazione temporale
- Classificazione in base alla natura fisica:
 - Aerodinamici
 - Gravitazionali
 - Centrifughi
 - Inerziali
 - Interni
 - Oscillazioni e vibrazioni
- Condizioni di progetto



- Flessione per il peso proprio

$$dM_P = g\rho A_r dr \cdot r \sin \omega t$$

$$M_{P_{max}} = \int_{R_0}^R r \cdot g\rho A_r dr$$



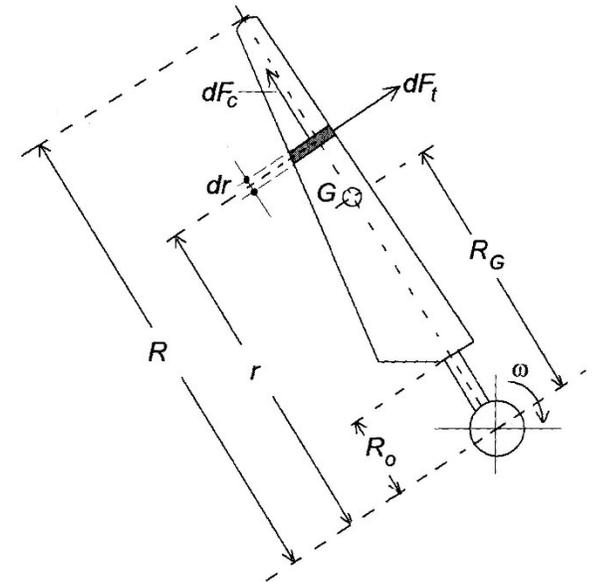
- Flessione per l'inerzia rotazionale

$$dF_t = r\dot{\omega} \cdot \rho A_r dr$$

$$\begin{cases} F_t = \int_{R_0}^R dF_t = S_b \dot{\omega} \\ M_m - M_r = J_r \dot{\omega} \end{cases}$$

↓

$$F_t = (M_m - M_r) \frac{S_b}{n_b J_b}$$

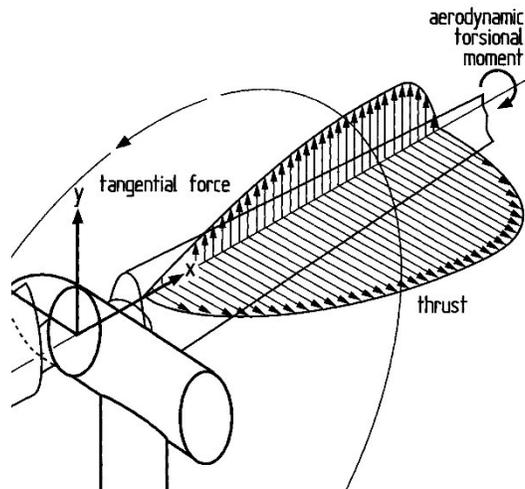


- Flessione per la spinta assiale

$$T = \frac{1}{2} \rho C_T \pi R^2 v^2$$

$$M_{fa} = \frac{2}{3} \rho C_T \pi R^3 v^2 \cdot \frac{1}{n_b}$$

$$T_{v_{max}} = \frac{1}{2} \rho v_{max}^2 \int_{R_0}^R c(r) C_{D,max} dr \cong \rho v_{max}^2 A_b$$

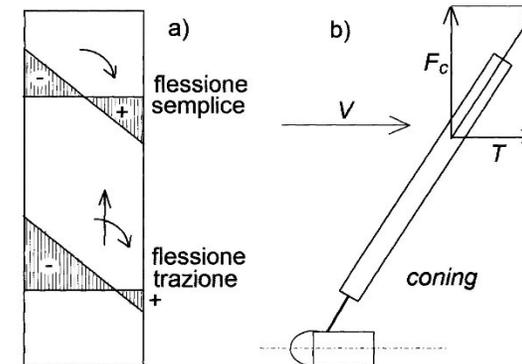


- Trazione per la forza centrifuga

$$F_c = m_b R_G \omega^2$$

$$\lambda_f = \frac{u_{max}}{v_f}$$

$$\rightarrow \omega_{max} = \frac{\lambda_f v_f}{R}$$



- Sollecitazioni per raffiche/imbardata

$$w^2 = u^2 + v^2 + 2uv \sin(\varepsilon)$$

$$\tan \phi = \frac{v \cos \varepsilon}{u + v \sin \varepsilon}$$

$$\alpha = \phi - \beta$$

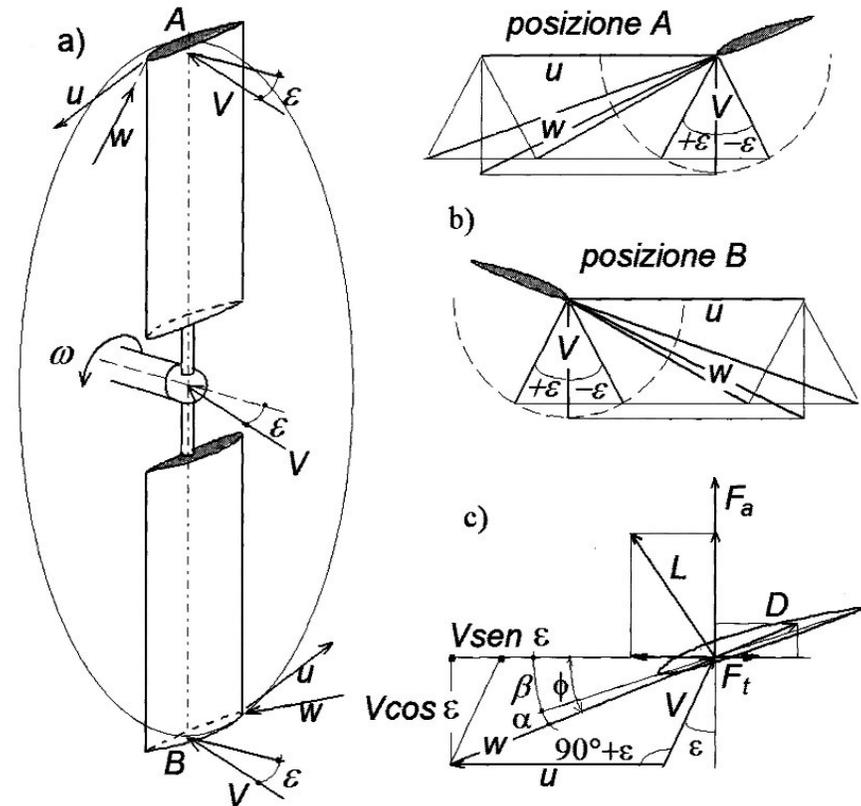
↓

w, ϕ, α

↓

$$dT = dL \cos \phi + dD \sin \phi \quad \text{forza assiale}$$

$$dS = dL \sin \phi - dD \cos \phi \quad \text{forza tangenziale}$$



- Sollecitazioni per inerzia giroscopica

$$\begin{cases} x = -r \sin \theta \sin \theta' \\ y = r \sin \theta \cos \theta' \\ z = -r \cos \theta \end{cases}$$

con:

$$\dot{\theta} = \omega$$

$$\dot{\theta}' = \omega'$$

$$\ddot{\theta} = \ddot{\theta}' = 0$$

$$\begin{cases} dF_x = -\ddot{x}dm \\ dF_y = -\ddot{y}dm \\ dF_z = -\ddot{z}dm \end{cases} \rightarrow \begin{cases} F_{ga} = dF_x \\ dF_{gt} = dF_y \cos \theta + dF_z \sin \theta \\ dF_{gr} = dF_y \sin \theta - dF_z \cos \theta \end{cases}$$

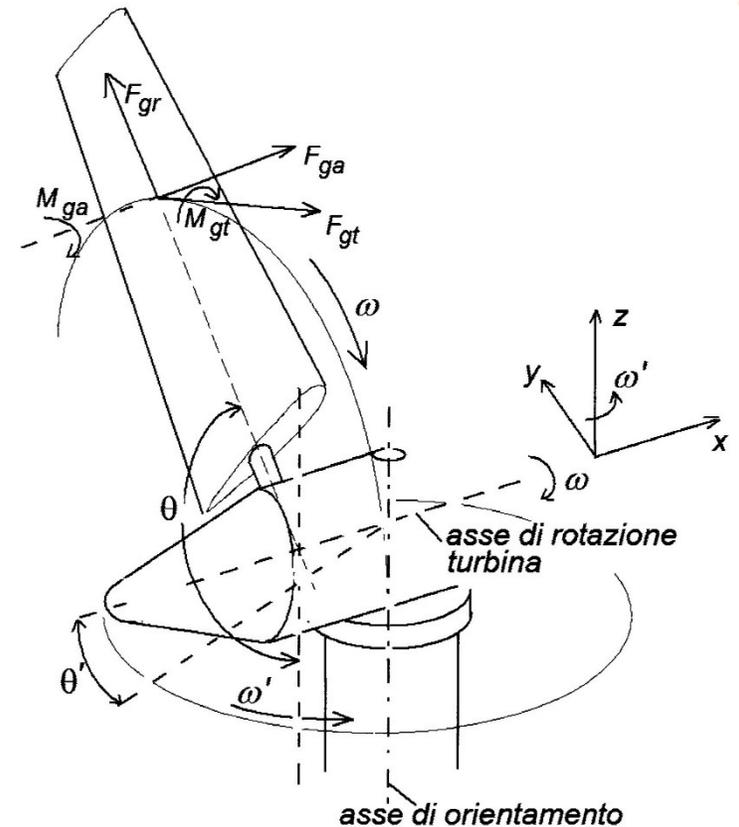
$$F_{ga} = 2 \cos \theta \omega \omega' S_b$$

$$F_{gt} = \frac{1}{2} \sin 2\theta \omega'^2 S_b$$

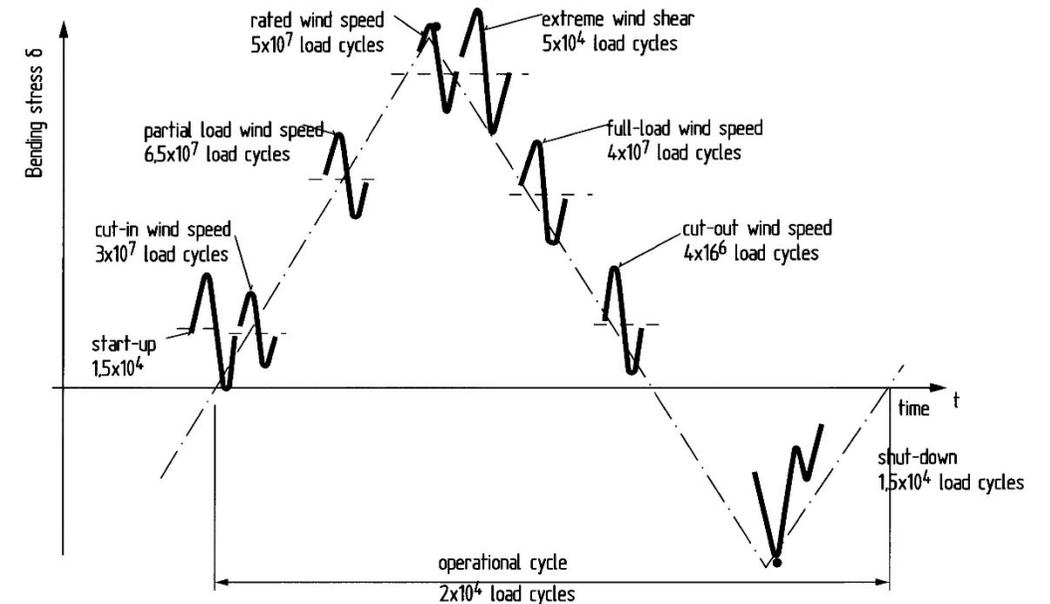
$$F_{gr} = (\omega^2 + \sin^2 \theta \omega'^2) S_b$$

$$M_{ga} = \frac{1}{2} \sin 2\theta \omega'^2 J_b$$

$$M_{gt} = 2 \cos \theta \omega \omega' J_b$$



- La verifica strutturale di componenti soggetti a carichi periodici si basa sul problema della fatica.
- Si utilizza uno spettro di carico, composto da fluttuazioni di sollecitazioni periodiche e stocastiche.



- Compromesso tra costo, peso e prestazioni.
- Ottimizzazione della forma o ricerca di nuovi materiali
- Differenze tra acciaio, fibra di vetro, fibra di carbonio, legno lamellare
- Materiali intelligenti

