

Università degli Studi di Padova – Dipartimento di Ingegneria Industriale

Corso di Laurea in Ingegneria Aerospaziale

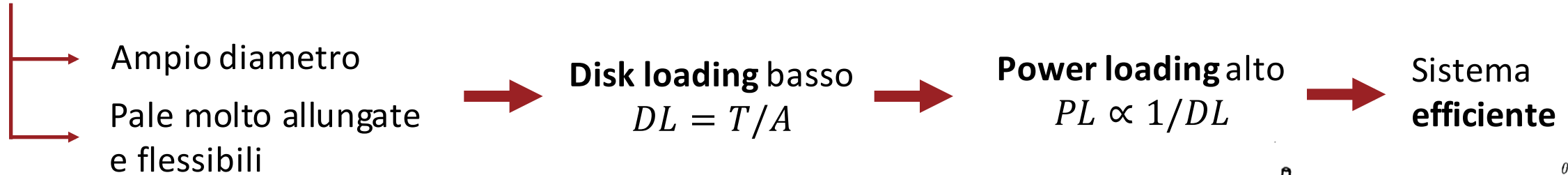
***Relazione per la prova finale
«Strutture delle eliche degli elicotteri:
sollecitazioni dinamiche, materiali e
dimensionamento»***

Tutor universitario: Prof. Galvanetto Ugo

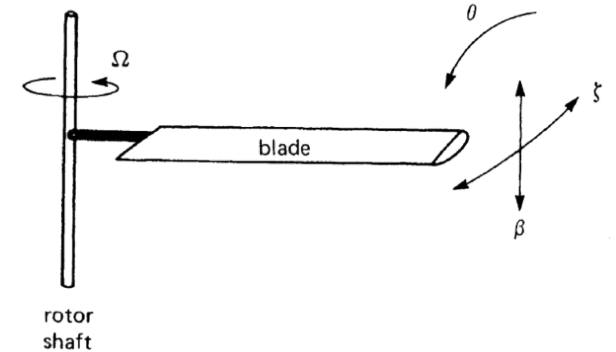
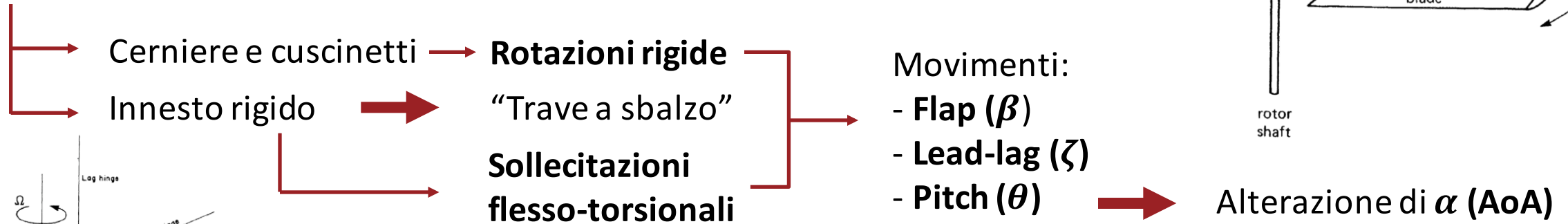
Laureanda: *Dalprà Elisa Nicole*

Padova, 18/09/2025

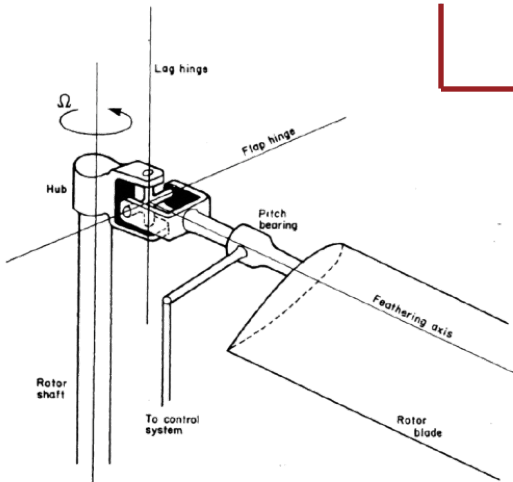
- Rotore composto da pale **tra loro identiche** → Profili aerodinamici



- Giunzione delle pale al mozzo

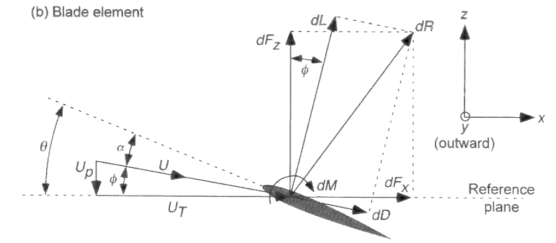


- Distribuzione di velocità al bordo d'attacco della pala **asimmetrica** in **forward flight**



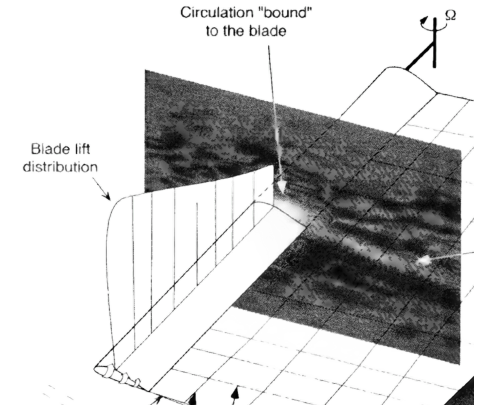
- **Pressione** → Esercitata dal **fluido** sul **profilo** → **Forza risultante dR**
 - ↳ Definizione di un **coefficiente C_p**
 - ↳ Componenti **dL** e **dD**

$$C_p = \frac{p - p_\infty}{\frac{1}{2} \rho_\infty U_\infty^2} = 1 - \left(\frac{U}{U_\infty}\right)^2$$



- **Portanza L** → ⊥ alla direzione di U
 - ↳ $dL = \frac{1}{2} \rho U^2 c(R) C_l dy$ → Integrando lungo R → **Distribuzione di L sulla pala**

C_l esprime l'azione della **pressione** → $C_l = C_l(\alpha, Re, M) \propto (C_{pV} - C_{pD})$
e della **velocità** su L



- **Resistenza D** → Opposizione allo spostamento → $D = D_p + D_i + D_w$

Combinazione di forze con origine diversa → **Drag parassita D_p**

- ↳ *Pressure drag*
- ↳ *Viscous shear drag*

↳ **Drag indotto D_i** → || alla direzione di U

↳ $D = \int_{eR}^R \frac{1}{2} \rho U^2 c(R) C_d dy$ → C_d esprime l'azione della **pressione** e della **velocità** su → $C_d = C_d(\alpha, Re, M)$

- **Momento flettente** → Fuori dal piano del disco rotore

 - Vi concorrono **portanza, forza centrifuga e inerzia rotazionale** → $M_\beta + M_{CF} + M_{I_\beta} = 0$
 - Ricavare **geometria e/o materiale** della pala → $M_f(y) = EI_y \frac{d^2w(y)}{dy^2}$
 - Fondamentale in caso di rotore *hingeless* → *Hinge offset* per la massima **curvatura** dato da e

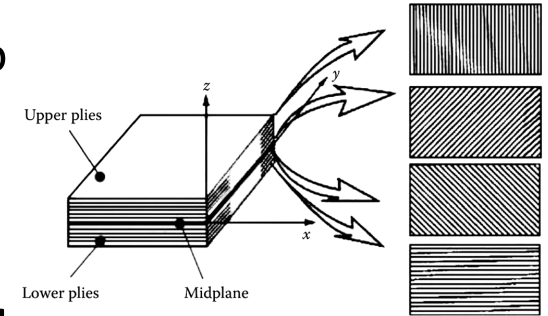
- **Momento di trascinamento** → Dentro al piano del disco rotore → Rappresenta momento flettente

 - Vi concorrono **resistenza, forza centrifuga e inerzia rotazionale** → $M_\zeta + M_{CF} + M_{I_\zeta} = 0$
 - Ricavare **geometria e/o materiale** della pala
 - Fondamentale in caso di rotore *hingeless*

- **Momento torcente** → Azione dei **carichi aerodinamici e dinamici** → **Non applicati all'asse elastico**

 - **Momento aerodinamico intrinseco** → *Pitching moment* → Azione dalla **distribuzione di pressione**
 - Influenza la **variazione dell'angolo di passo θ**

- **CFRP** → Fibre di **carbonio** immerse in **matrice**
 - Resina o materiale plastico
 - Metalli (MMC)
- Laminazione $0^\circ, \pm 45^\circ, 90^\circ$ → Alto valore di E e ottima σ_t (\gg metalli)
- Caratteristiche meccaniche e leggerezza → Largamente impiegati nella **pala**



- **GFRP** → Fibre di **vetro** immerse in **matrice** (resina)
 - Diverse **categorie** per proprietà meccaniche
 - **E-glass** (bassa conducibilità elettrica)
 - **S-glass** (resistenza σ_t medio-alta)
 - Largamente impiegati nella **pala**
 - $E, \sigma_t <$ carbonio
 - Costi più **contenuti** del carbonio

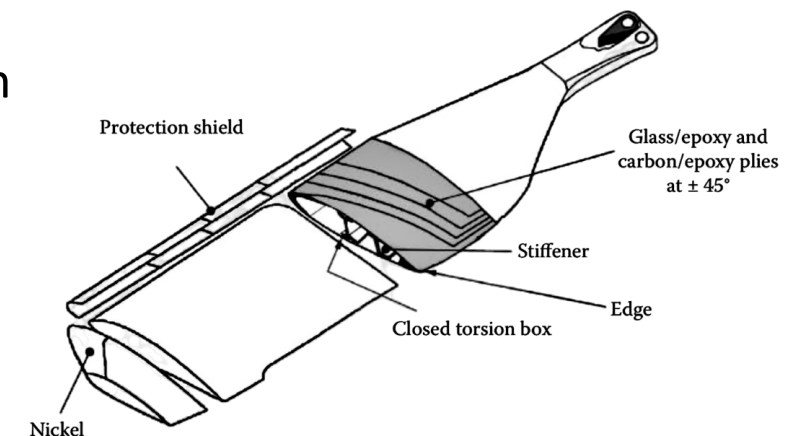
- **Compositi aramidici** → Para-aramidi → **Kevlar** (K-49 e K-149) → Fibre in **matrice polimerica** o a rinforzo
 - Meta-aramidi → Allineamento delle catene → Buoni valori di E e σ_t
 - **Nomex**
 - Valori di E e $\sigma_t <$ Kevlar
 - Bassa **densità** → Pannelli **honeycomb** → Carta aramidica in resina fenolica

- **Alluminio** → Serie **2000**, Al-Cu → Buone **prestazioni meccaniche e stabilità strutturale**

 - ↳ Scarsa resistenza corrosione → **ALCLAD**, negli *skins*
 - ↳ **Rivestimento sottile** in altra lega
- ↳ Serie **5000**, Al-Mg → Pannelli *honeycomb* → Alternativa più economica del Nomex

 - ↳ Compromesso sulla riduzione del peso
- **Titanio** → Leghe con alluminio, vanadio, ferro → **Resistenza meccanica** comparabile con **acciaio**

 - ↳ **Leading edge erosion cups** → Rivestimenti in lamiera, 1÷2 mm
 - ↳ **Protezione da impatti e abrasioni**
 - ↳ **Blade cuffs** → Carenature alla radice della pala
 - ↳ **Protezione e rinforzo della giunzione al mozzo**



▪ **Processo iterativo** → **Fase concettuale** → **Parametri globali**

↳ **Fase preliminare** → **Verifica vincoli fisici e meccanici**

▪ **Dimensionamento pratico** → Esempio con *Bell 412*

↳ ▪ **Diametro del rotore** → Basso *disk loading*, 30÷40 kg/m² → $DL = \frac{T}{A} = \frac{W}{\pi R^2} \Rightarrow R = 7,01 \text{ m}$

↳ ↳ Garantire capacità operativa in autorotazione

↳ ↳ Compromesso tra requisiti di efficienza e di peso → Raggio attorno ai 12 m max

↳ ▪ **Forma in pianta della pala** → **Solidità e corda media** → Relazione tra **spinta** e **portanza** in *hovering*

↳ ↳ $dC_T = \frac{1}{2} \sigma C_l R^2 dR \Rightarrow \sigma \approx 0,07 \div 0,10$

↳ ↳ $\sigma = \frac{A_b}{A} = \frac{N_b \bar{c}}{\pi R} \Rightarrow \bar{c} \approx 370 \text{ mm}$

↳ ▪ **Numero di pale, N_b** → Compromesso tra effetti aerodinamici, peso e rumore

↳ ↳ 4 pale

- **Longherone** → Elemento principale → Sopporta **carichi** e garantisce **resistenza meccanica**

 - ↳ Forma a **D rovesciata** → **Sezione anteriore ricurva** → Risponde a **trazione e flessione**
 - ↳ Titanio o materiali compositi → *Bell 412* in **fibra di vetro**
 - ↳ Spessore 3,8÷10 mm
 - ↳ **Sezione posteriore piatta** → Chiude **torsion box** → Resistenza alla **torsione**
 - ↳ *Bell 412* in **fibra di vetro**
 - ↳ Si innestano i pannelli *honeycomb*

- **Rivestimenti esterni** → Gusci protettivi → Resistono a **sforzi di taglio e momenti torcenti**

 - ↳ *Bell 412* in **fibra di vetro**

- **Anima interna** → Pannelli a nido d'ape → Rinforzo strutturale dei gusci contro deformazioni

 - ↳ *Bell 412* in **Nomex** con celle disposte a $\pm 45^\circ$

- **Carichi aerodinamici e relativi momenti** → Come agiscono e come si calcolano
- **Materiali utilizzati** → Quali sono, quali caratteristiche meccaniche possiedono, dove sono impiegati
- **Dimensionamento e struttura della pala** → Quali parametri si devono stabilire, come dimensionare l'elica, quali componenti costituiscono la struttura della pala seguendo un esempio reale
- **L'ottimizzazione della pala non può prescindere da un approccio integrato che ha portato allo sviluppo di rotori sempre più performanti e aperto la strada a nuove frontiere di ricerca meccanica, strutturale e in ambito dei materiali**