



UNIVERSITÀ  
DEGLI STUDI DI TRIESTE

**Corso di Propulsione**

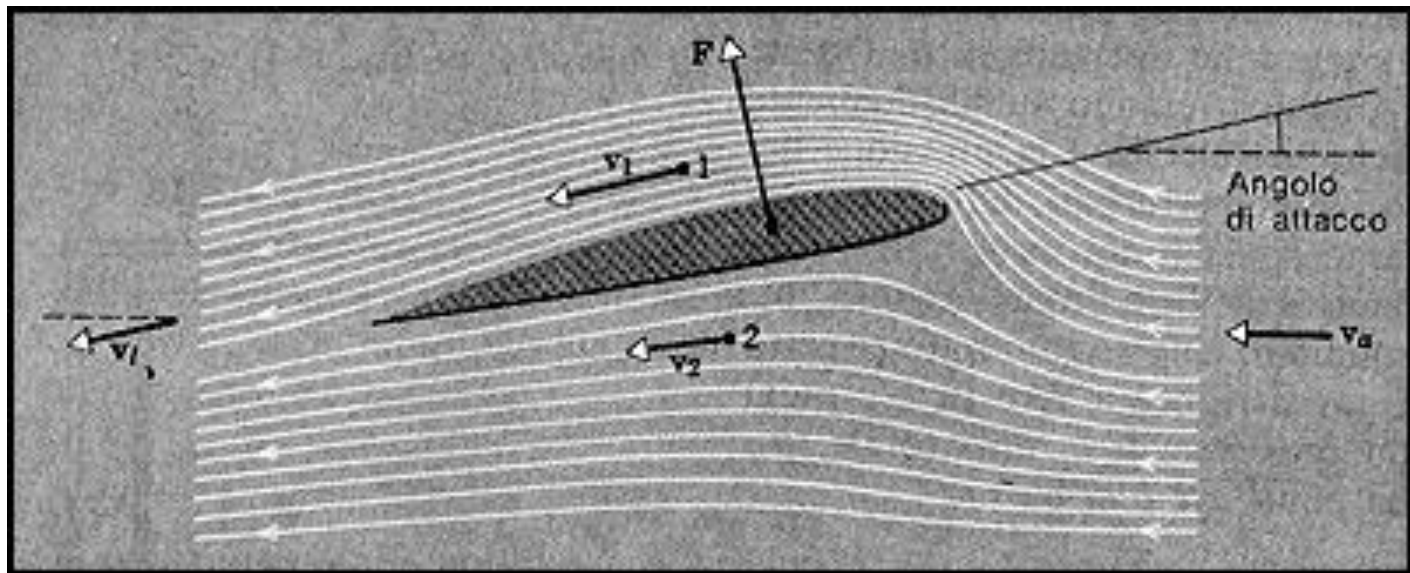
# **Idrodinamica dei Profili Portanti**

**Prof. Paolo Frandoli**

AA 2022-2023

# Generalità

- Superficie portante: un corpo affusolato che, muovendosi in un fluido che lo investe con un piccolo angolo d'incidenza, genera una forza idromeccanica di portanza in direzione pressoché perpendicolare al suo moto di avanzamento
- Varie modellazioni per stimare il flusso:
  - analitici, numerici
  - a potenziale, in flusso vorticoso, strato limite
  - esatti, linearizzati, parzialmente linearizzati



# Forze generate dal profilo

- Le forze (portanza e resistenza) sono generate dalla geometria del profilo poiché esso modifica la velocità (e quindi la pressione) del flusso incidente
- La pressione  $p$  in ogni punto del dorso ( $p_b$ ) e della faccia ( $p_f$ ) della sezione di pala si determina con il teorema di Bernoulli:

$$p_b = p_0 + \rho/2*(V_0^2 - V_b^2) = p_0 + \Delta p_b$$

$$p_f = p_0 + \rho/2*(V_0^2 - V_f^2) = p_0 + \Delta p_f$$

Dove  $p_0$  e  $V_0$  sono rispettivamente la pressione e la velocità del flusso indisturbato incidente il profilo,  $V_b$  e  $V_f$  le velocità lungo il profilo,  $\rho$  la densità del fluido.

- La pressione si esprime solitamente in termini adimensionali con il coefficiente di pressione  $C_p$ :

$$C_{p_b} = (p_b - p_0) / \rho/2*V_0^2$$

$$C_{p_f} = (p_f - p_0) / \rho/2*V_0^2$$

- La differenza di pressione tra faccia e dorso, integrata sulla lunghezza di corda, genera la forza sul profilo ( $C_{p_f} > 0$  e  $C_{p_b} < 0$ )

$$\text{Carico idrodinamico: } (C_{p_f} - C_{p_b}) = (p_f - p_b) / \rho/2*V_0^2$$



# Forze generate dal profilo

- La forza si scompone in due componenti
  - Portanza, ortogonale al flusso incidente (Lift, L)
  - Resistenza, parallela al flusso incidente (Drag, D)

$$L = C_L \cdot \frac{\rho V_0^2}{2} S$$

$$D = C_D \cdot \frac{\rho V_0^2}{2} S$$

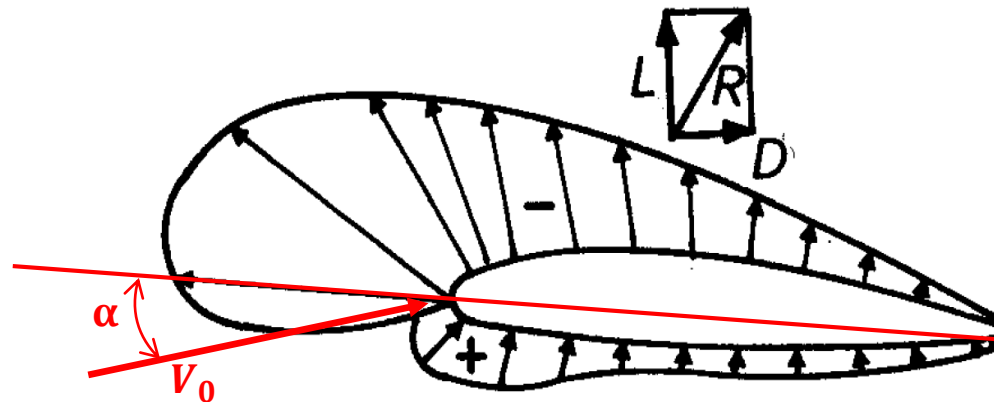
$$K = \frac{C_L}{C_D}$$

$C_L$ : Coefficiente di Portanza

$C_D$ : Coefficiente di Resistenza

Efficienza  
Aerodinamica

- S: area del profilo bidimensionale



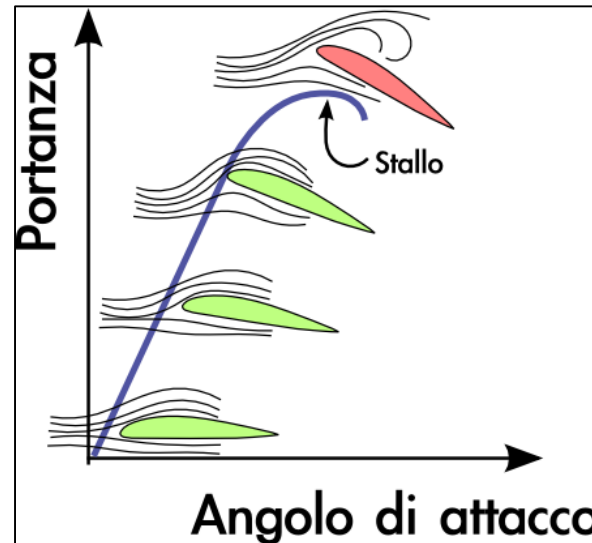
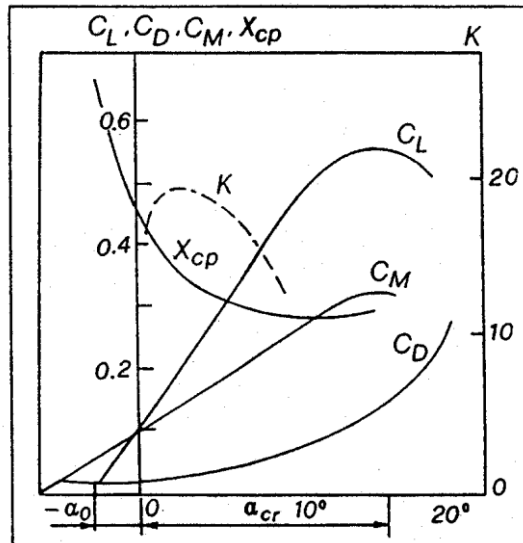
# Centro di Pressione

- Centro di pressione: punto di applicazione di  $R$
- Distanza dal bordo d'ingresso:  $x_{cp}$
- Momento di  $R$  rispetto al bordo d'ingresso

$$M_{le} = C_M \cdot \frac{\rho V_0^2}{2} S c \quad C_M = C_L \cdot \frac{x_{cp}}{c}$$

- Per misure effettuate in punti diversi dal bordo d'ingresso

$$M_{le} = M_x - L \cdot x$$



# Forze e geometria del profilo

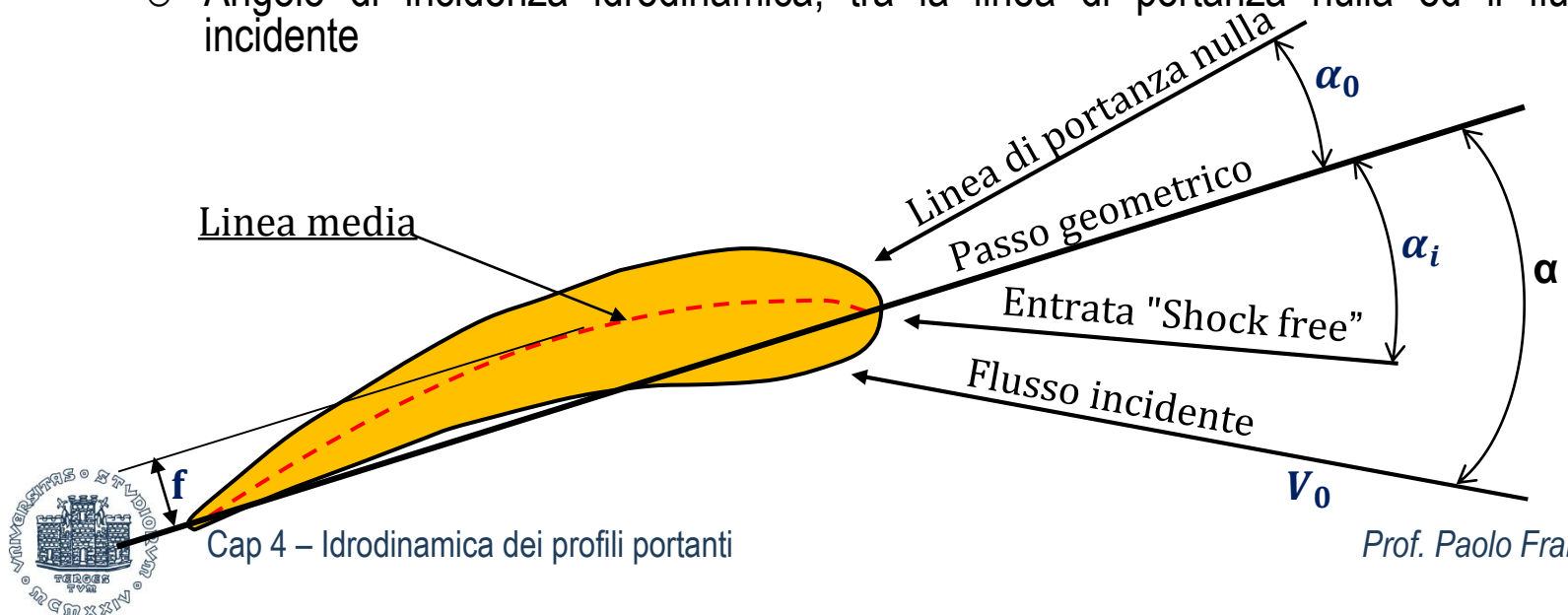
Il carico idrodinamico lungo la corda è determinato da:

## 1. Curvatura del profilo

- Distribuzione della curvatura, cioè la linea media del profilo
- Valore massimo della curvatura  $f$ , carico proporzionale a  $f/C$

## 2. Incidenza del flusso sul profilo

- Angolo d'attacco, tra la linea del passo geometrico e la direzione del flusso incidente ( $\alpha$ )
- Angolo di portanza nulla, tra la linea del passo e quella di portanza nulla ( $\alpha_0$ )
- Angolo ideale, detto "shock free", per il quale il carico è generato dalla sola curvatura ( $\alpha_i$ )
- Angolo di incidenza idrodinamica, tra la linea di portanza nulla ed il flusso incidente



# Forze e geometria del profilo

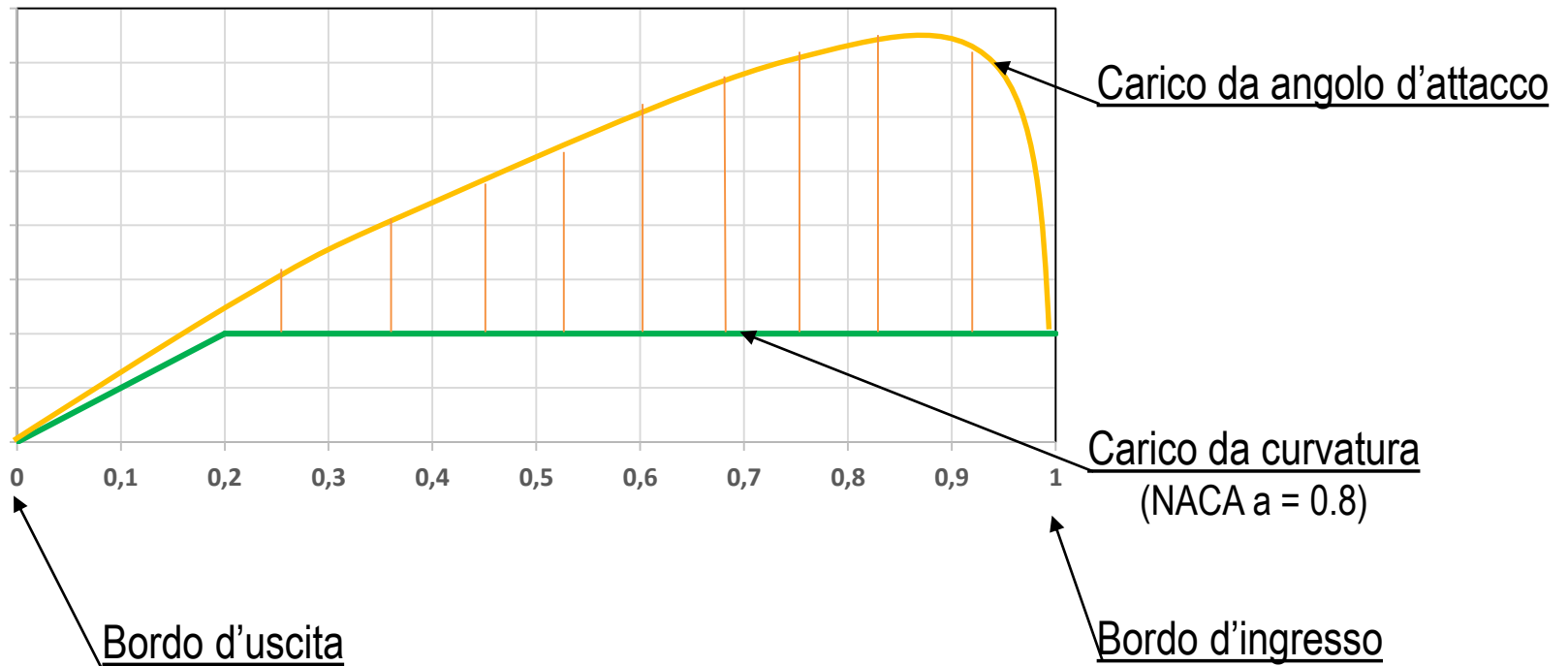
- In base alla teoria dei profili alari sottili, la distribuzione di carico è la risultante di una distribuzione base, funzione dell'angolo d'incidenza ideale, ed una distribuzione addizionale, proporzionale all'angolo d'incidenza misurato rispetto all'angolo d'incidenza ideale

$$C_L = C_{L_f} + C_{L_\alpha}$$

- La linea media solitamente utilizza in campo navale è la NACA  $a = 0.8$  che crea un carico idrodinamico costante lungo il profilo fino a 0.8 della lunghezza dal bordo di ingresso, all'angolo d'attacco "shock free". Ciò permette di ottenere gradienti di carico moderati anche nel caso di flusso non uniforme ritardando l'insorgenza della cavitazione
- L'angolo d'attacco crea una distribuzione di carico caratterizzata da un picco al bordo d'ingresso, tanto più accentuato quanto più elevata è l'incidenza del flusso rispetto al profilo

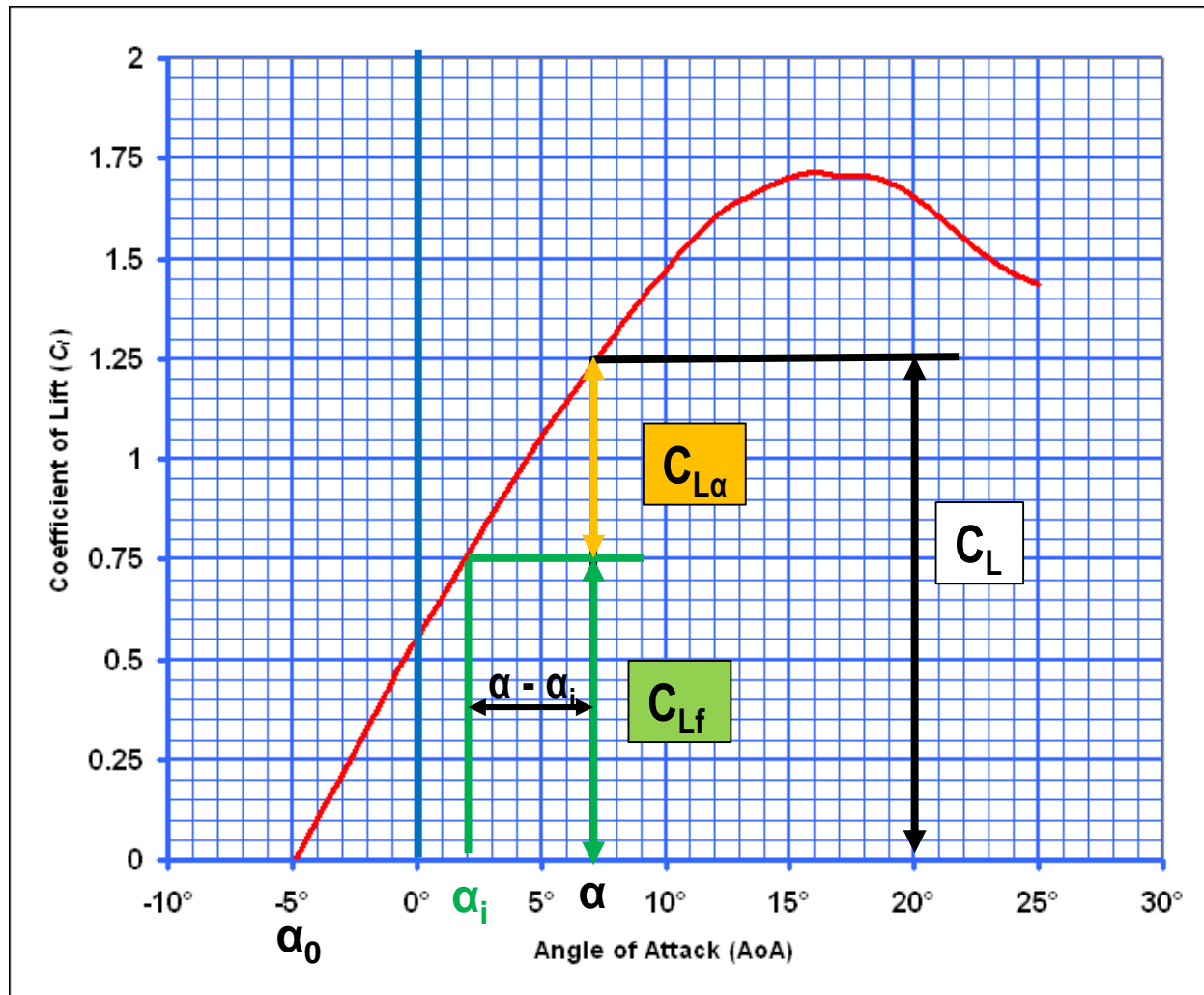


# Forze e geometria del profilo





# Forze e geometria del profilo



# Teoria dei Profili Alari Sottili

- Profilo sottile:  $t/C = 0,08 \div 0,01$
- Modella il profilo alare riducendolo alla sola linea mediana
- Applica una distribuzione di vorticità sulla linea mediana (assunzione lecita in quanto lo spessore è ridotto)
- Consente di determinare, nota la geometria, formule approssimate per:
  - portanza
  - posizione del centro di pressione
  - distribuzione del carico
  - angolo di incidenza ideale



# Stima della Portanza e della Resistenza

## Fluido ideale

### Angoli d'incidenza piccoli ( $3 \div 5^\circ$ ), profili bidimensionali sottili

- Le modellazioni dei profili alari si basano sulla teoria del flusso potenziale in fluido ideale
- $C_L = 2 \pi \alpha \longrightarrow C_L$  è funzione lineare dell'angolo d'incidenza
- La pendenza di  $C_L$  è indipendente dal tipo di profilo
- $C_{L_f}$  è proporzionale a  $f/C$  e  $\alpha_i$

$$C_L = C_{L_f} + C_{L\alpha} = C_{L_f}(f/C, \alpha_i, t_m/C) + 0,1097 * (\alpha - \alpha_i)^\circ$$

- Per la linea media NACA a=0.8:

$$f/C = 0,0679 * C_{L_f}$$

$$\alpha_i^\circ = 1,54 * C_{L_f}$$

- Il coefficiente di resistenza è praticamente costante e si può assumere

$$C_D = 0.08$$

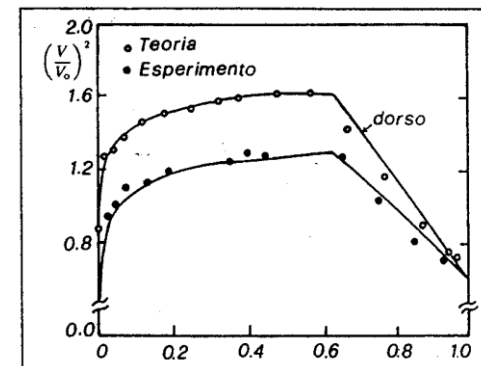
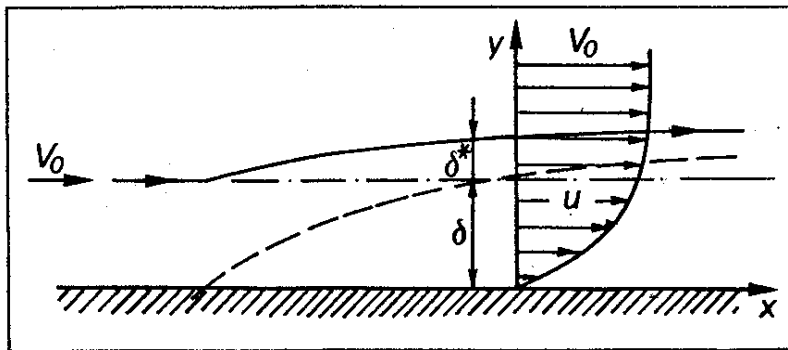


# Stima della Portanza e della Resistenza

## Fluido reale

Angoli d'incidenza piccoli ( $3\div 5^\circ$ ), profili bidimensionali sottili

- La viscosità crea lo strato limite, dove la velocità varia trasversalmente dal valore nullo sulla superficie del profilo al valore del flusso locale sul bordo esterno dello strato
- Il calcolo delle velocità nello strato limite è complesso, non applicabile praticamente al calcolo dell'elica navale
- Gli effetti della viscosità sono generalmente piccoli. L'approssimazione della teoria del flusso potenziale è accettabile per i profili più usati in campo navale



# Stima della Portanza e della Resistenza

## Fluido reale

Angoli d'incidenza piccoli ( $3\div 5^\circ$ ), profili bidimensionali sottili

- Effetti principali della viscosità:
  - La pendenza di  $C_L$  è inferiore a quella teorica
  - $C_D$  è più alto del valore teorico
  - L'angolo di portanza nulla  $\alpha_0$  è inferiore al valore teorico
  - $C_{L_{max}}$  dipende da  $R_n$
- Gli effetti viscosi su  $C_L$ ,  $C_D$  e  $\alpha_0$ , comunque piccoli, ma non trascurabili, vanno tenuti in conto nella procedura di calcolo dell'elica:
  - Conoscenza delle caratteristiche dello strato limite
  - Esperienza del progettista
  - Coefficienti correttivi in base a risultati sperimentali alla galleria del vento
  - Coefficiente correttivo per  $C_{L\alpha}$ 
    - $C_{L\alpha} = (0,1097 \cdot \alpha) * \{ 1 - k(t/C) \}$
    - NACA 16:  $k = 0,61$
    - NACA 66:  $k = 0,83$
    - NACA 66 mod.:  $k = 0,83$



# Stima della Portanza e della Resistenza

## Fluido reale

**Angoli d'incidenza piccoli ( $3\div 5^\circ$ ), profili bidimensionali sottili**

- L'elica navale opera ad elevati  $R_n$ : globalmente le forze viscosse sono minori di quelle inerziali
- Le principali modellazioni dell'elica si basano sulla teoria del flusso potenziale in fluido ideale: approssimazione sufficiente per applicazioni pratiche



# Effetto Persiana

- Nell'elica i profili alari sono a distanza ravvicinata → influenza reciproca detta effetto persiana o effetto tridimensionale
- Difficile da prevedere → occorrono prove sperimentali
- Causa una riduzione di  $\alpha_0$
- Causa una riduzione della pendenza della curva del  $C_L$
- L'effetto può essere valutato sommando ai risultati per numero infinito di pale una correzione funzione di  $Z$  e  $d_h$  (Goldstein, 1929)

