



UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI DI TRIESTE

Corso di Propulsione

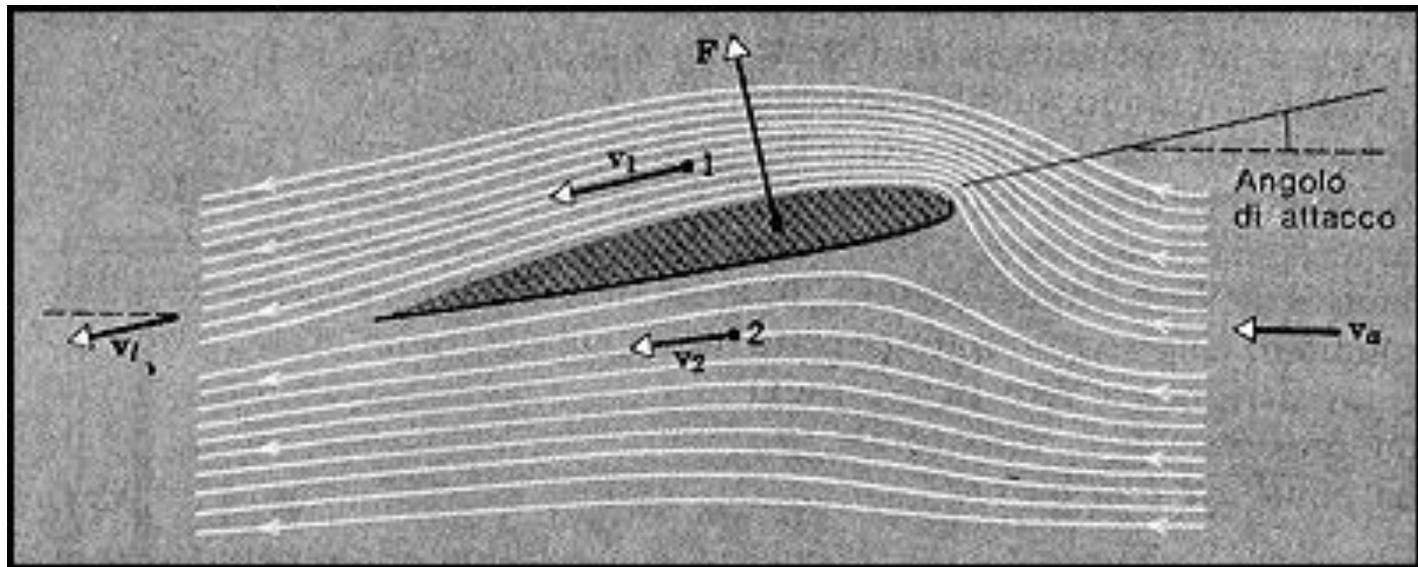
Idrodinamica dei Profili Portanti

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, ρ 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)

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

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

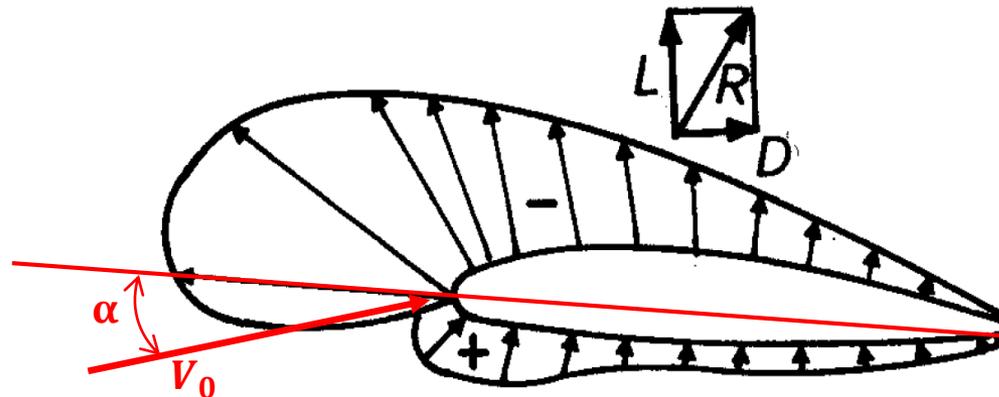
$$K = \frac{C_L}{C_D}$$

C_L : Coefficiente di Portanza

C_D : Coefficiente di Resistenza

Efficienza
Aerodinamica

- S: area del profilo bidimensionale



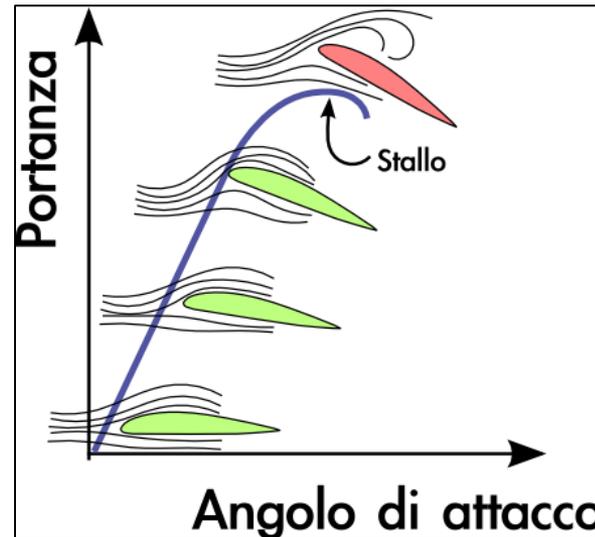
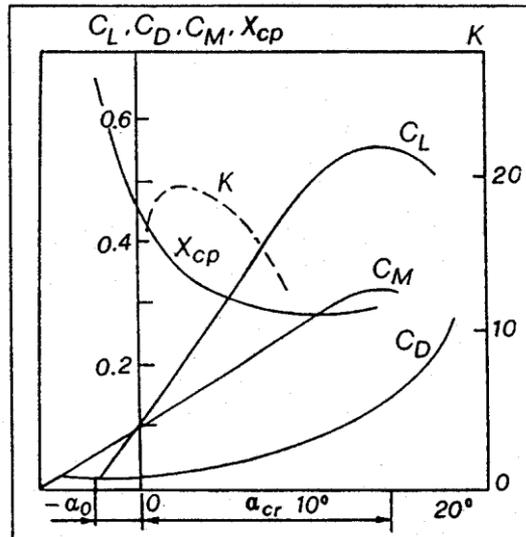
Centro di Pressione

- 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

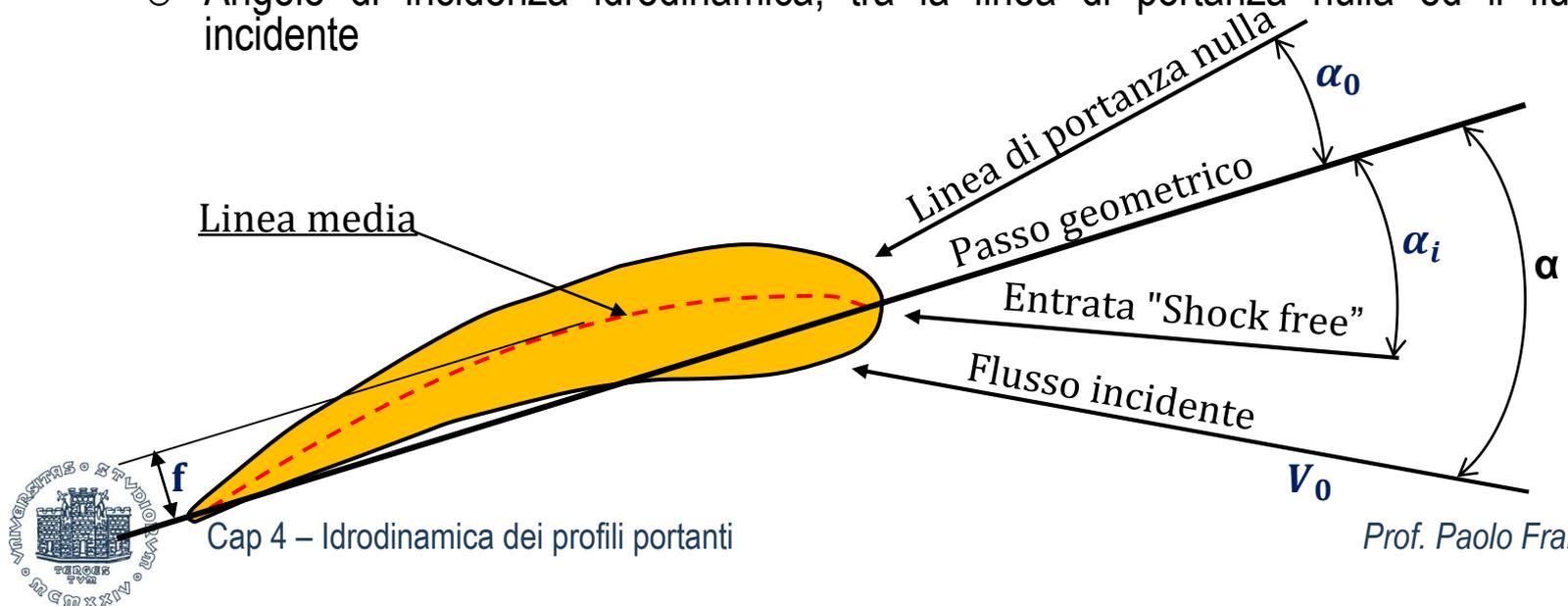
Il carico idrodinamico lungo la corda è determinato da:

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 (α)
- Angolo di portanza nulla, tra la linea del passo e quella di portanza nulla (α_0)
- Angolo ideale, detto "shock free", per il quale il carico è generato dalla sola curvatura (α_i)
- Angolo di incidenza idrodinamica, tra la linea di portanza nulla ed il flusso incidente



Forze e geometria del profilo

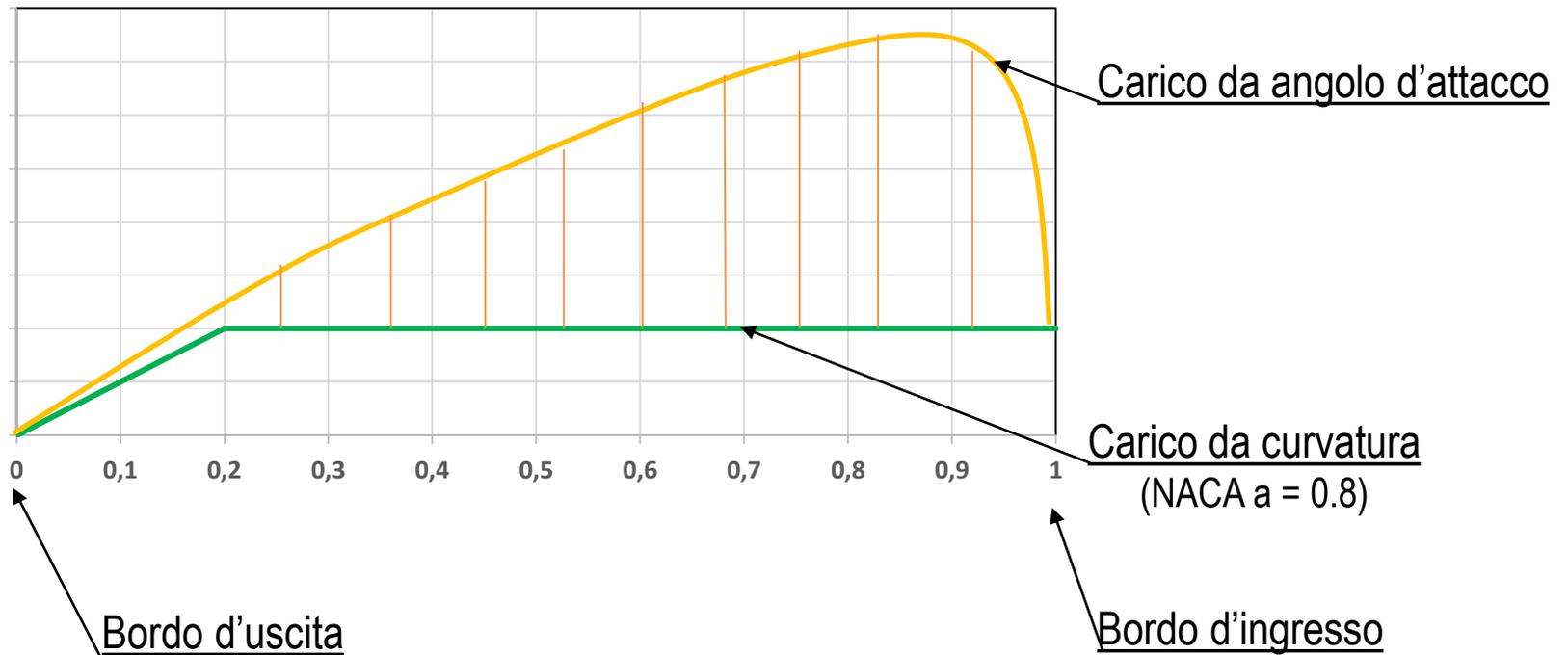
- In base alla teoria dei profili alari sottili, la distribuzione di carico è la risultante di una distribuzione base, funzione dell'angolo d'incidenza ideale, ed una distribuzione addizionale, proporzionale all'angolo d'incidenza misurato rispetto all'angolo d'incidenza ideale

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

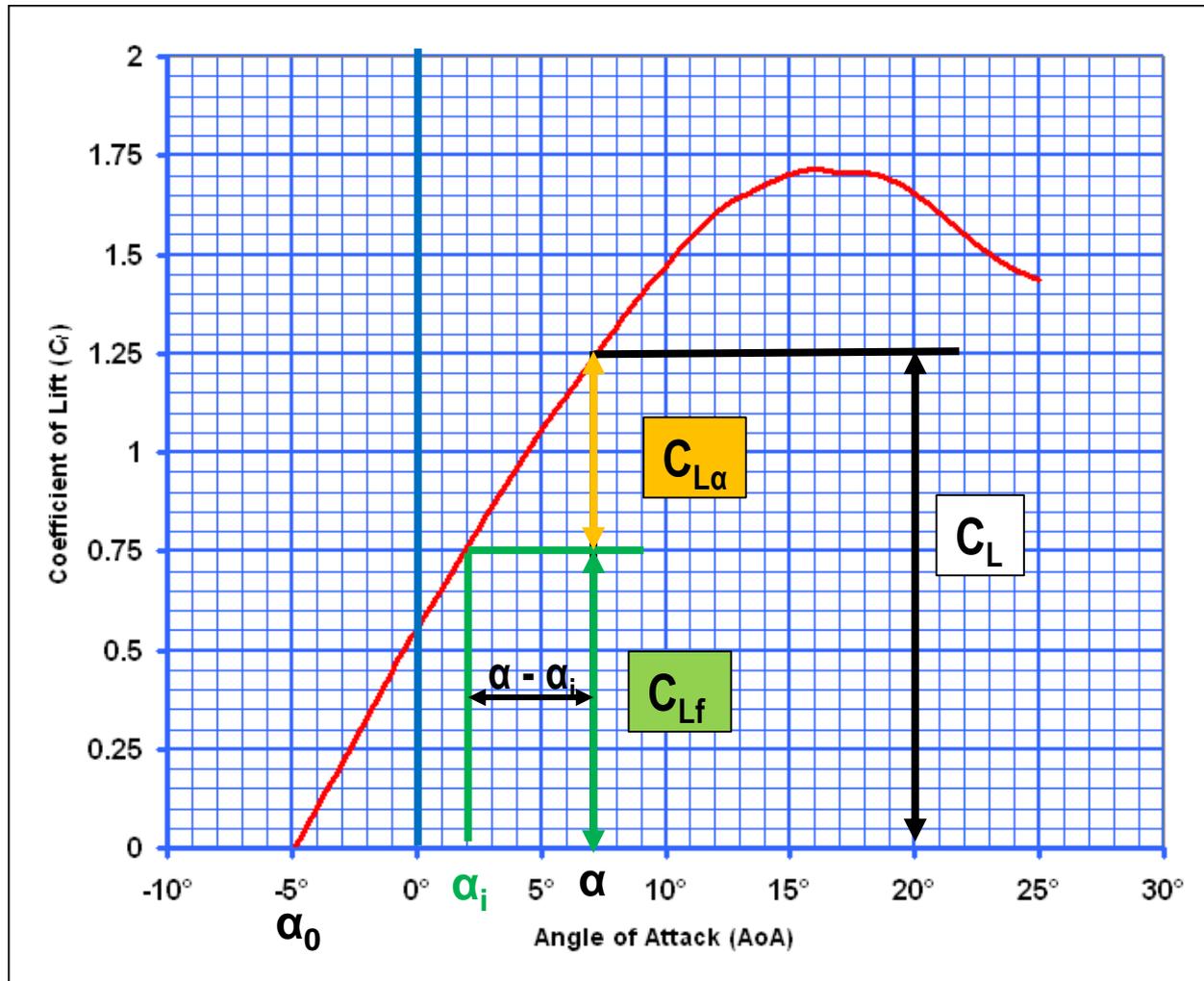
- La linea media solitamente utilizza in campo navale è la NACA $a = 0.8$ che crea un carico idrodinamico costante lungo il profilo fino a 0.8 della lunghezza dal bordo di ingresso, all'angolo d'attacco "shock free". Ciò permette di ottenere gradienti di carico moderati anche nel caso di flusso non uniforme 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 α_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

$$C_D = 0.08$$

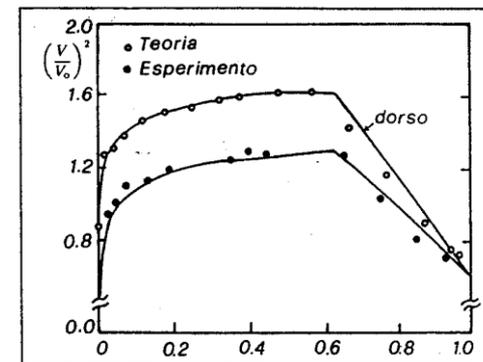
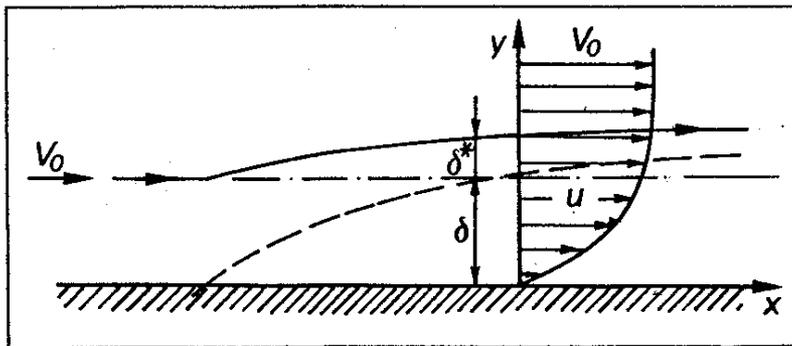


Stima della Portanza e della Resistenza

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 α_0 è inferiore al valore teorico
 - $C_{L_{max}}$ dipende da R_n
- Gli effetti viscosi su C_L , C_D e α_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 $C_{L\alpha}$
 - $C_{L\alpha} = (0,1097 \cdot \alpha) \cdot \{1 - k(t/C)\}$
 - 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 α_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)

