

Università degli Studi di Padova - Dipartimento di Ingegneria Industriale
Corso di Laurea in Ingegneria Aerospaziale

Relazione per la prova finale

Problematiche dell'accumulo di ghiaccio su un velivolo

Tutor Universitario: Prof. Francesco Picano.

Laureando:

Omar Al Bataineh n° 1218700

Padova, 22/03/2024

OBIETTIVO: analizzare le problematiche relative all'accumulo di ghiaccio su un velivolo

- FAA cataloga il ghiaccio come causa di almeno 37 incidenti aerei, molti dei quali mortali.

Strumenti:

- 1920-1930 primi studi aerodinamici sul ghiaccio
 - 2° Guerra Mondiale: primi ice-tunnel
 - 1978: grafici portanza-rugosità del ghiaccio della NASA
 - Oggi: Moderne tecniche CFD (Computational FluidDynamics)
-
- Aumento dell'aviazione regionale e microaviazione più esposti all'accumulo di ghiaccio e con sistemi di protezione meno sofisticati



Fig 1: West Caribbean 708 precipitato per all'accumulo di ghiaccio sulla sonda PT2 del motore [1]



Fig 2: British Airways 308 schiantato in seguito a blocco flusso di carburante ai motori per formazione di ghiaccio [2]

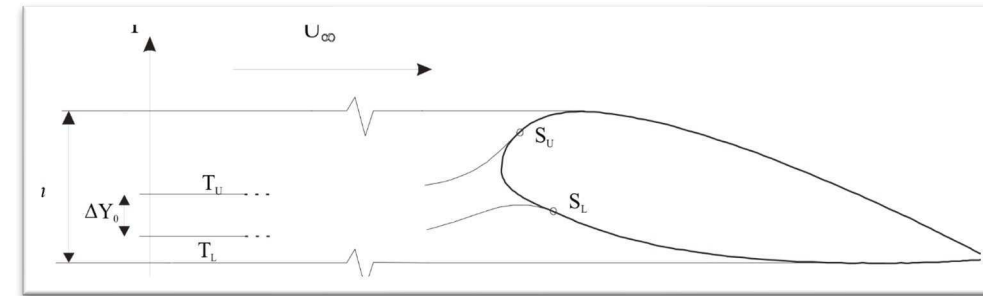
Il ghiaccio su un aereo può accumularsi:



Fig 3: precipitazioni nevose all'aeroporto di Chicago [3]

- A TERRA:
 - Condizioni climatiche “invernali” (nevicate, temperature al di sotto dei 0°C)
 - Procedure di de-icing

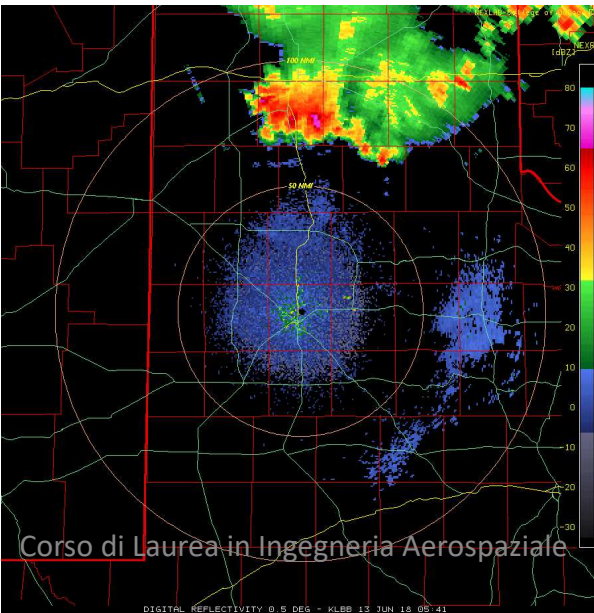
Fig 5: parametri che caratterizzano impatto sul profilo [5]



- IN VOLO
 - Nuvole: aggregati di vapore acqueo e/o cristalli di ghiaccio
 - Gocce sopraffuse (stato liquido nonostante basse temperature) solidificano a contatto di una particella solida
 - Effetti ghiacciamento variano in base a: dimensioni gocce, contenuto d'acqua, condizioni di volo, geometria velivolo, tempi di esposizione

$$E = \frac{\Delta Y_0}{h}$$

Fig 4: immagine satellitare di una perturbazione sul Texas FAA [4]



METODO ITERATIVO

- I. Con CFD si computa il flusso aerodinamico attorno al corpo
 - II. Con approccio lagrangiano si computano le traiettorie dei droplets e si determinano le distribuzioni delle masse d'acqua
 - III. Con PoliMIce si definisce nuovo aspetto geometrico causato dall'accrescimento del ghiaccio
 - IV. Viene creata la nuova "maglia" basata sulla geometria del ghiaccio
 - V. La mesh creata al passaggio precedente viene riutilizzata nel metodo iterativo nel punto I
- LST (level-set-method)
 - Rappresento curva come isocontorno della funzione ausiliaria $\Phi(x,t)$

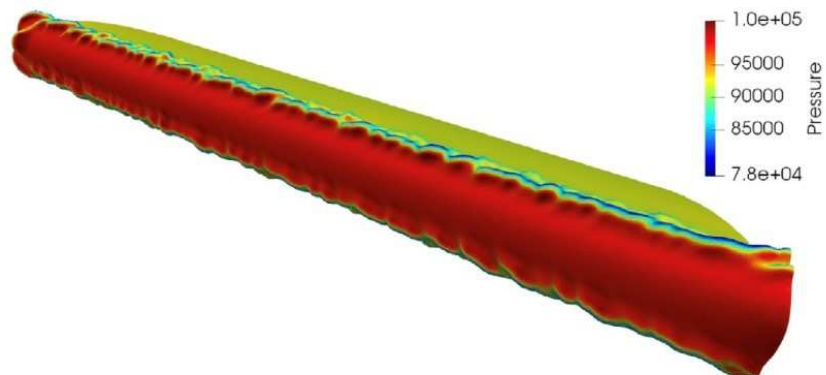


Fig 7: profilo aerodinamico computato con CFD [7]

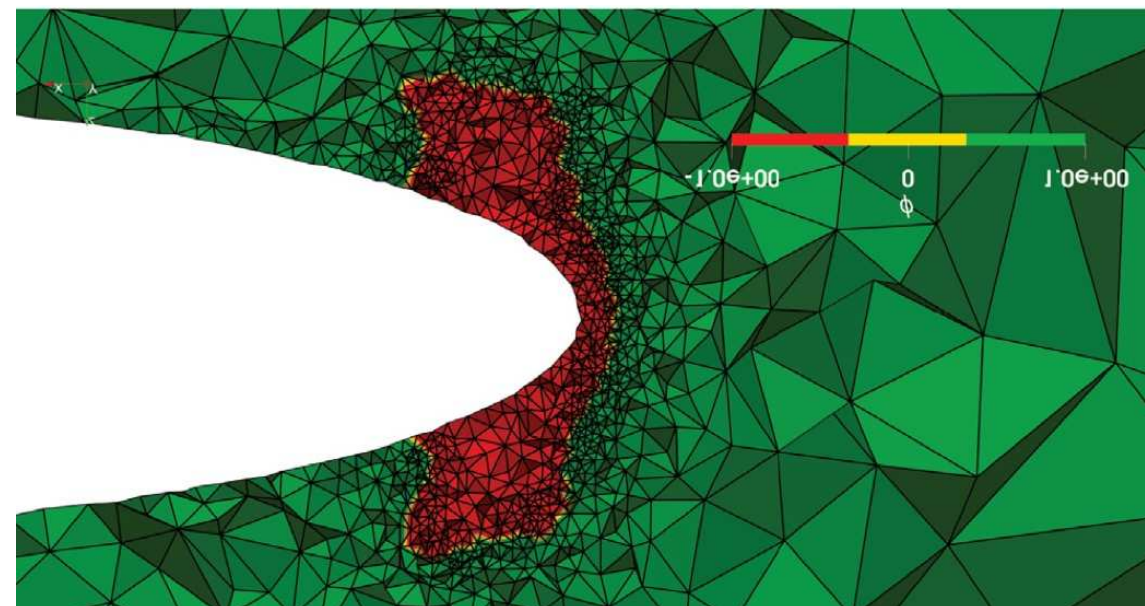


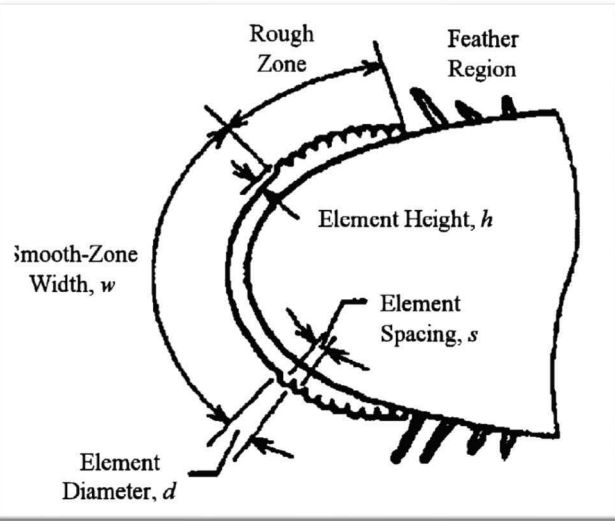
Fig 6: geometria della nuova forma ghiacciata [6]

$$\Phi(x,t) = \begin{cases} <0 & \text{nella porzione del dominio occupato dal materiale} \\ >0 & \text{nella porzione del dominio non occupato dal materiale} \\ =0 & \text{nelle interfacce} \end{cases}$$

$$\frac{\partial \Phi}{\partial t} + u \cdot \nabla \Phi = 0$$

-u velocità del fronte di avanzamento

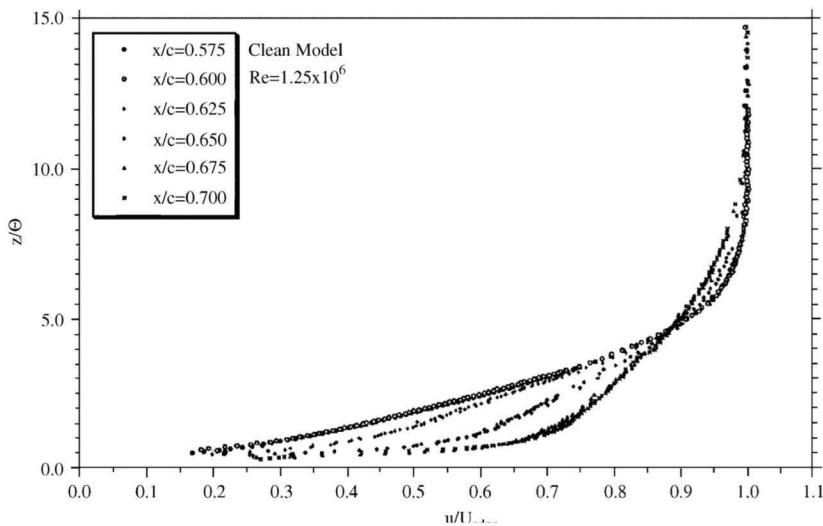
GHIACCIO RUGOSO



- Gocce congelano istantaneamente all'impatto
- Ogni ruga provoca distacco strato limite
- Gradiente di pressione causa: vortici primari e ferro di cavallo
- Flusso turbolento oltre $Re = 600$

Da grafico u/U_{edge} e spessore del momento

- $x/c = 0.575$ profilo laminare
- $x/c = 0.700$ tozzo
- $x/c = 0.675$ passaggio a turbolento



Effetto della densità

- $C_{l,max}$ diminuisce fino a crescita el. Del 30%
- Oltre 30% effetto trascurabile

Fig 10: profili delle velocità in un NACA 0012 con $Re = 1.25 \times 10^6$ e $M=0.11$ [10]

Fig 9: flusso attorno ad una ruga isolata per $Re < 300$ in vista a) laterale b) frontale c) dall'alto [9]

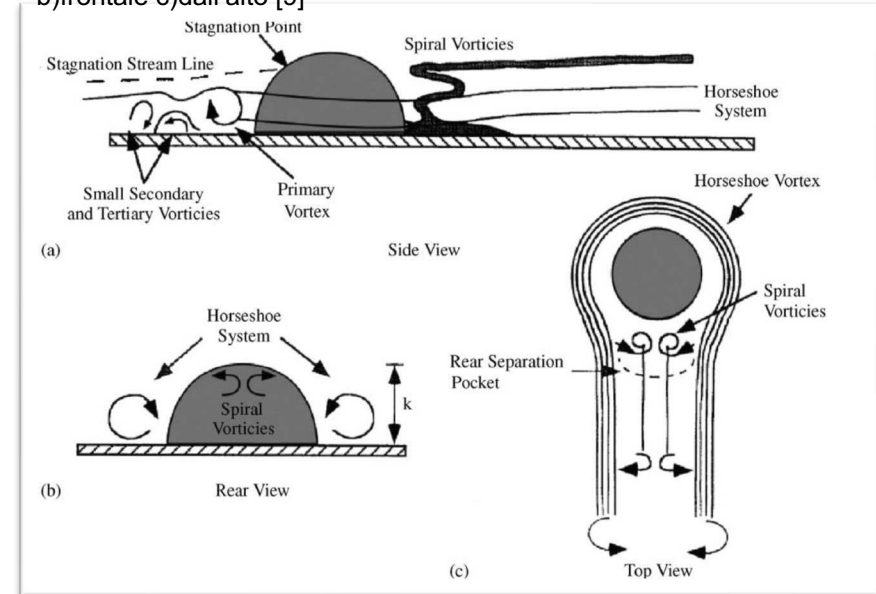
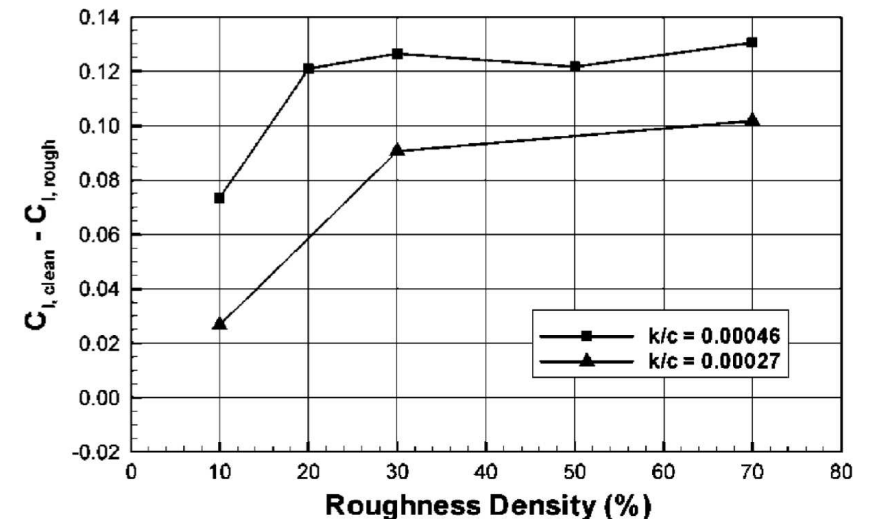


Fig 11: grafico che mostra effetto delle densità e dimensione delle rughe [11]



HORN ICE

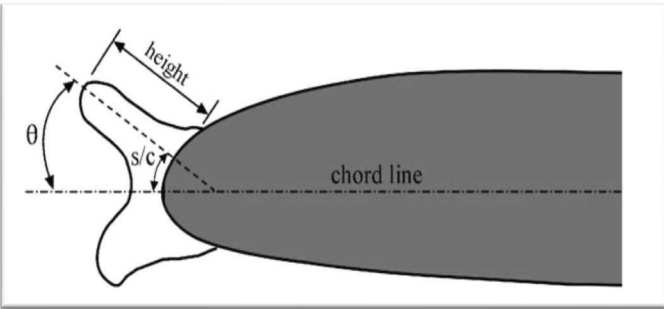


Fig 12: profilo alare soggetto ad horn ice [12]

➤ Gocce si uniscono creando strato d'acqua che scorre prima di congelarsi

- Separazione a bolla a poppa del cono
- Effetti sul C_p
- Moti convettivi instabili, crescono con angolo di attacco

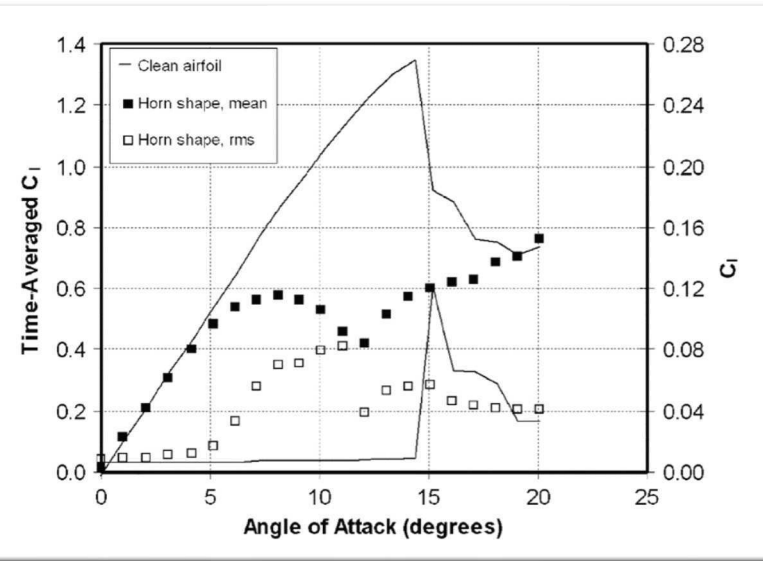


Fig 14: effetto delle grandezza del corno sul C_l a $Re = 1.8 \times 10^6$ e $M=0.18$ e $k/c=0.14$ [14]

La portanza

- Profilo pulito $C_l < 0.015$ e stallo dopo dato α
- Profilo ghiacciato C_l aumenta anche per angoli elevati
- $C_l = 0.04$ zona post stallo

I fattori importanti sono:

- Altezza corno
- Angolo inclinazione flusso
- Posizione rispetto al profilo aerodinamico

Effetti variano se cono è situato su profilo superiore o inferiore

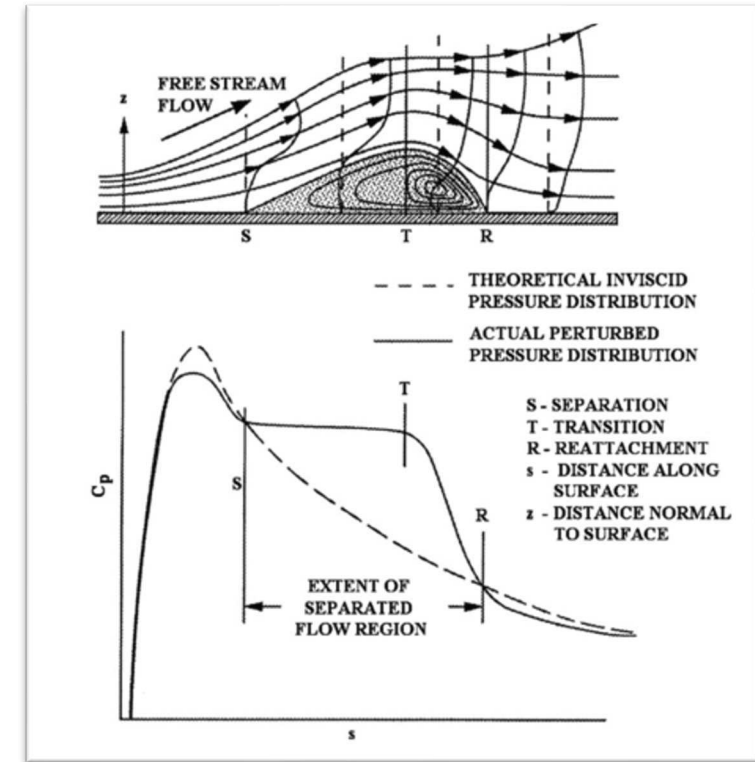


Fig 13: schematizzazione flusso a bolla e distribuzione di pressione [13]

STREAMWISE-ICE

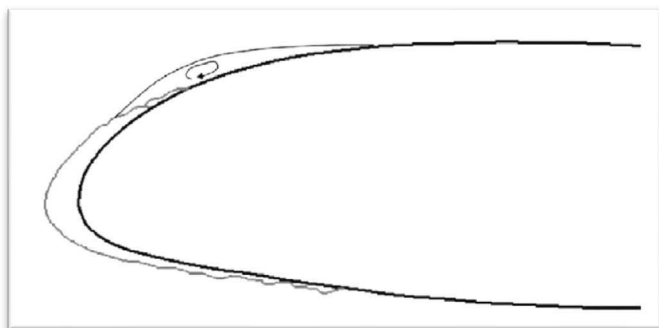
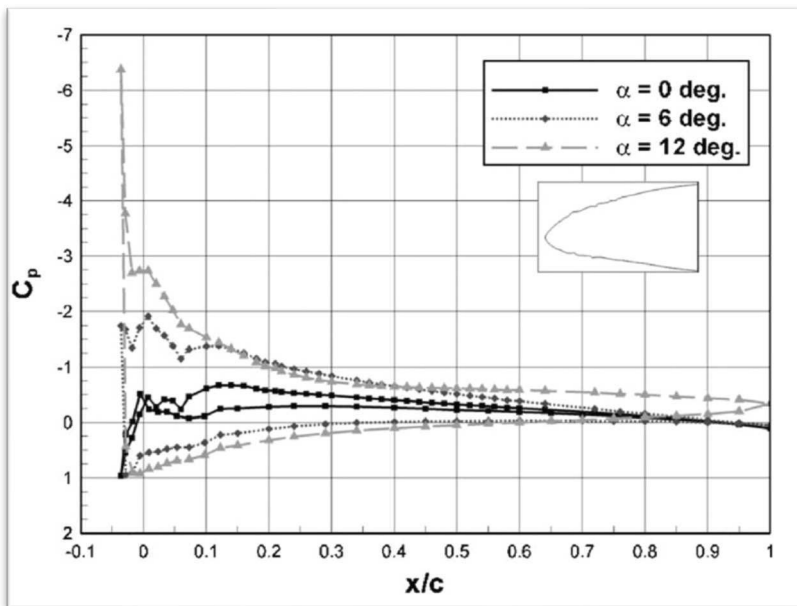


Fig 15: formazione di ghiaccio streamwise su un profilo alare [15]



- Basse temperature, congelamento istantaneo
- Liscio, diffuso sulle pareti

Effetti sulla portanza

- Approssimativamente lo strato può considerarsi come un'estensione del LE
- Separazione strato limite; dipende da angolo di attacco, Re
- Stallo transita da LE a TE

Effetti sulla pressione

- Separazione strato limite cresce rapidamente con aumento angolo di attacco
- Ampi moti convettivi ma minori degli horn-ice

Fig 17: effetti dello streamwise-ice sul C_p a diversi angoli di attacco sul profilo NACA 23012 e $Re = 1.8 \times 10^6$ e $M = 0.18$ [17]

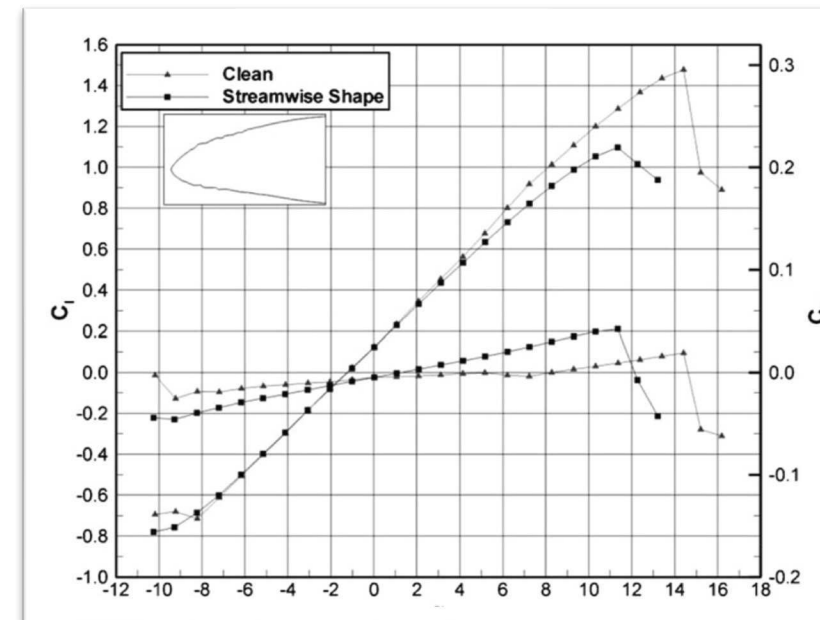
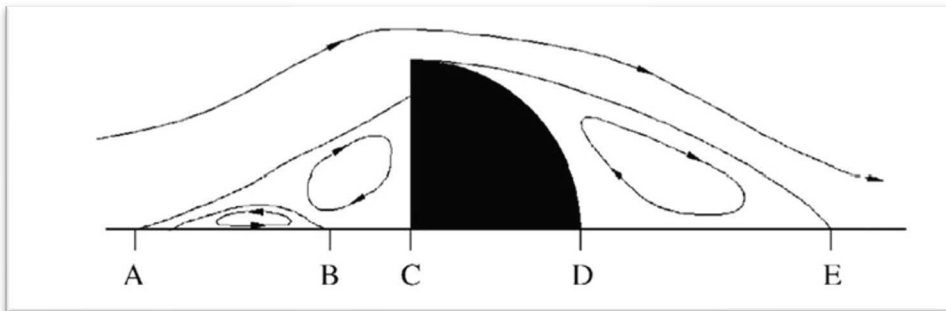


Fig 16: effetti dello streamwise-ice sul C_l e sul momento di beccheggio nel profilo NACA 23012 con $Re = 1.8 \times 10^6$ e $M = 0.18$ [16]

SPANWISE RIDGE ICE



- Formazione da SLD
- Vasta estensione, anche a parti non protette
- Moti convettivi prima e dopo la cresta
- Parametri di influenza: altezza, posizione, geometria, uniformità

Fig 18: simulazione di un flusso attorno ad una cresta di spanwise ridge ice [18]

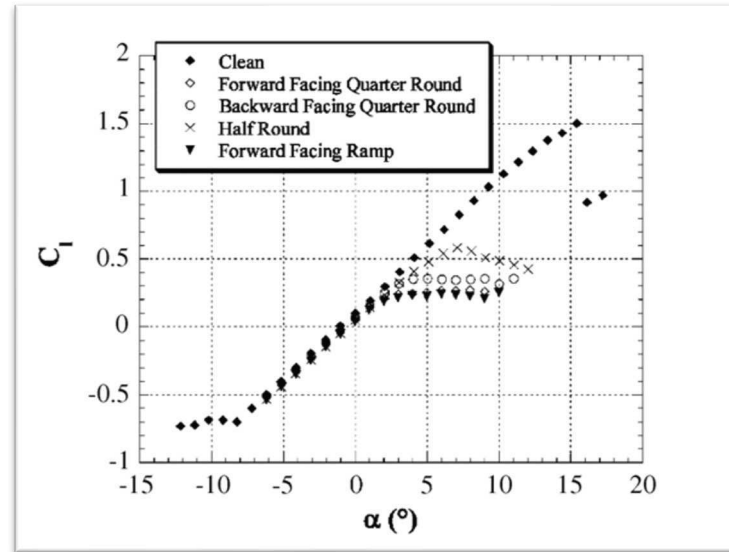
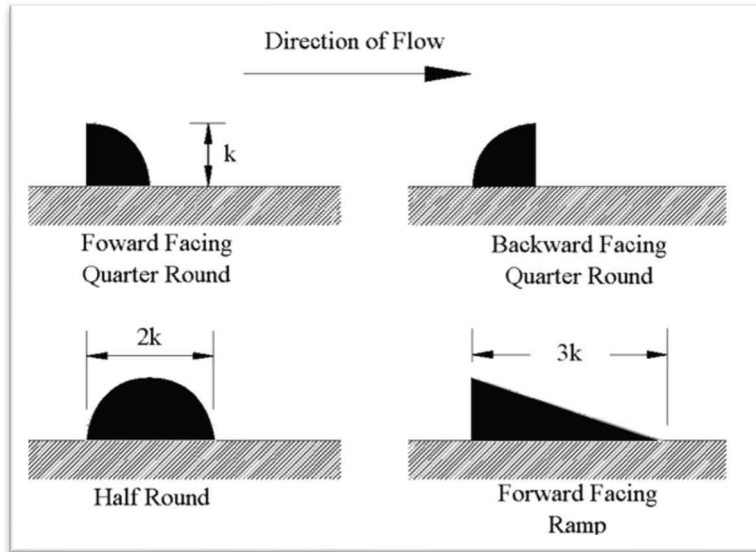
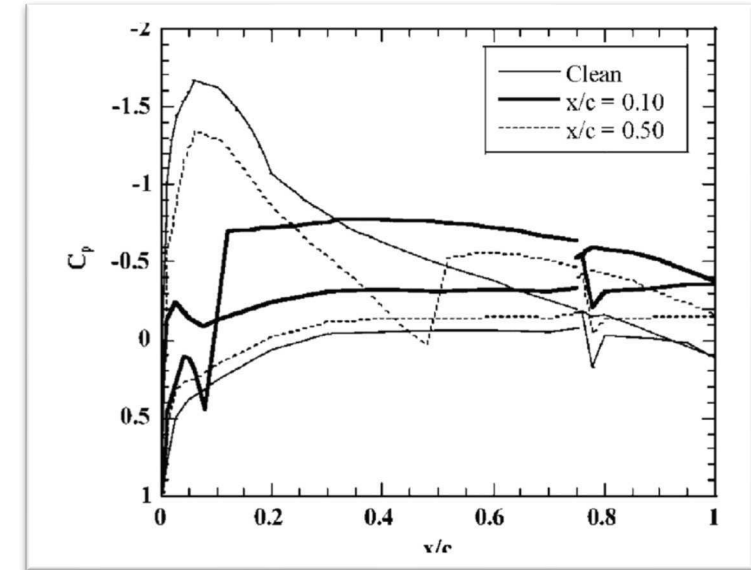


Fig 20: effetto della geometria sul C_p localizzato a $x/c = 0.10$ su NACA 23012 con $Re = 1.8 \times 10^6$ e $M = 0.18$ [20]

Fig 19: effetto sul C_p del quarto di sfera per $\alpha = 5^\circ$ e $Re = 1.8 \times 10^6$ in NACA 23012 [19]



Effetti della geometria

- Mezza sfera $C_1 = 0.6$
- Quarto di sfera $C_1 = 0.25$
- Forma taglia flusso in modo diverso

Il ghiaccio può accumularsi:



Fig 21: accumulo di ghiaccio sul LE [21]

- **Sul bordo d'attacco delle superfici portanti:**

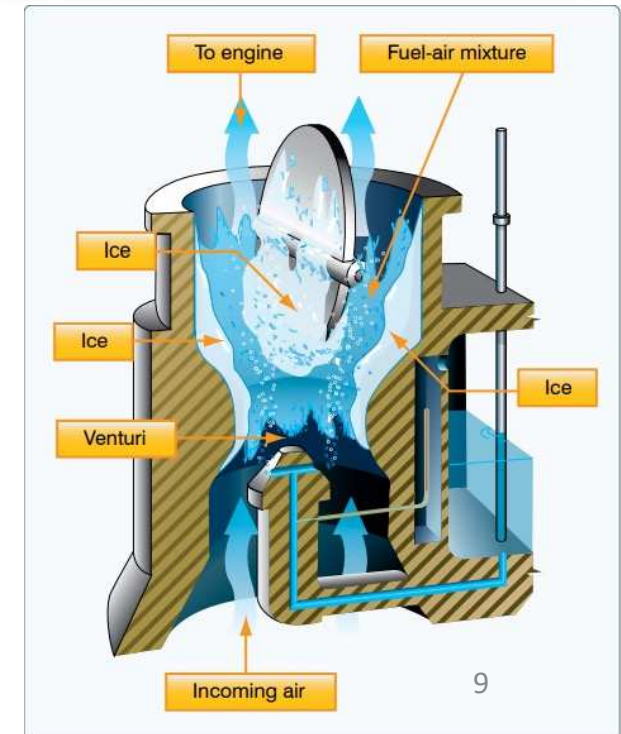
- Ala
- Stabilizzatore orizzontale
- alettoni

- **Sull'elica**

Fig 23: accumulo di ghiaccio sull'elica di un velivolo [23]



Fig 24: accumulo di ghiaccio in un carburatore [24]



- **Prese d'aria**

- **Antenne e sonde strumentali**

- **Parabrezza**

Fig 22: coefficiente di portanza ad ala pulita e con ghiaccio in un profilo alare [22]

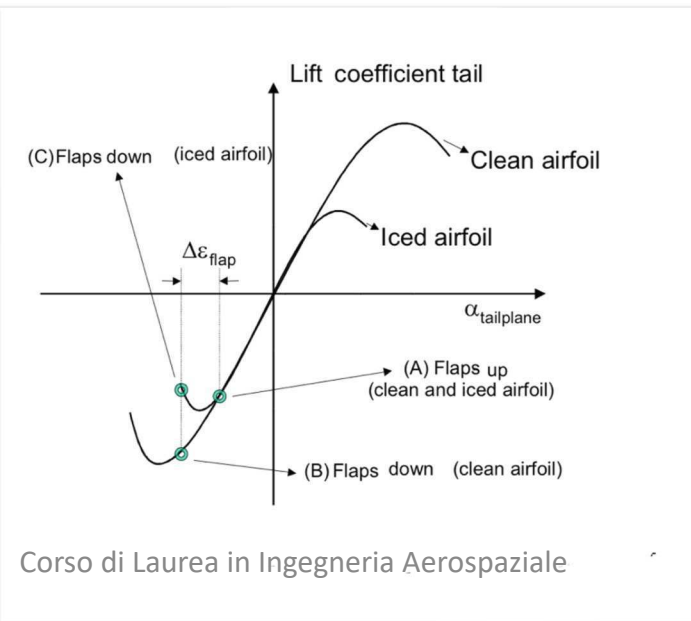
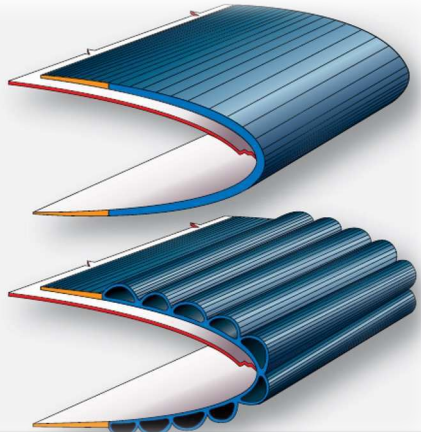


Fig 25: sistema Goodrich [25]



De-ice: rimozione ghiaccio a intervalli regolari

- **S. Goodrich**, bordo d'attacco
- **Aria calda**, sistema frenante

Divisi in 3 categorie:

Anti-ice: sistemi di prevenzione dell'accumulo di ghiaccio

- Fonte termica: -Resistenza elettrica
- Aerotermico

Fig 26: schema impianto antighiaccio su un ala [26]

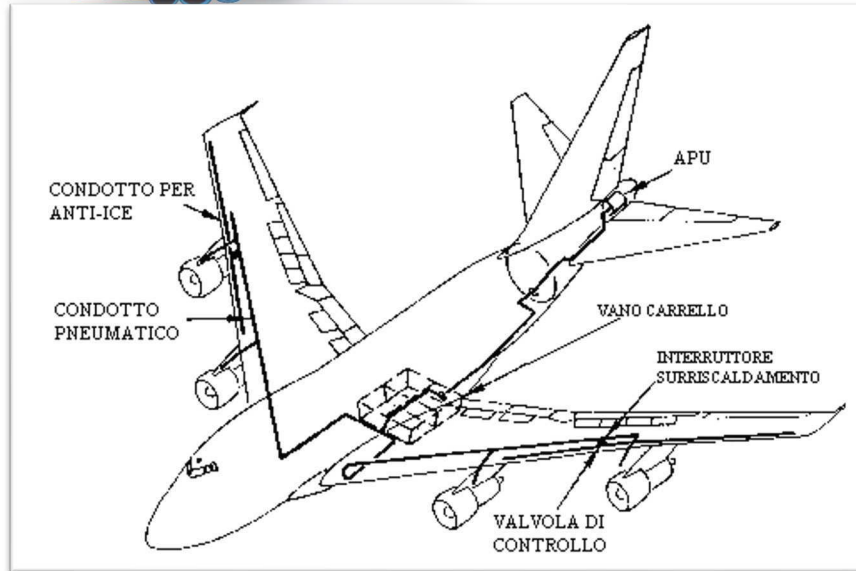
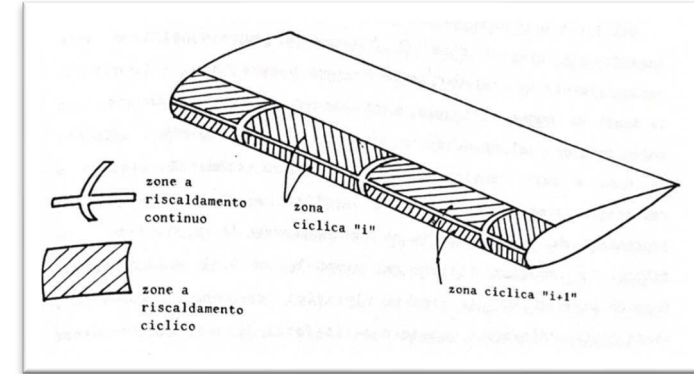


Fig 27: schema di distribuzione di uno spillamento di un Boeing 747 [27]

Procedure a terra: rimozione ghiaccio formato a terra

- Soluzione di acqua e Killfrost
- Fluido non newtoniano con funzione anti-ice



Fig 28: processo di deicing di un Airbus 330 [28]

- Il ghiaccio rappresenta una delle principali problematiche dell'aviazione
- In corso numerosi studi e ricerche



Fig 29: IWT (icing wing tunnel) una delle più grandi gallerie del vento per prove in ghiaccio esistente al mondo [29].

IWT (ICING WING TUNNEL), realizzato dalla CIRA

- Simula accrescimento ghiaccio fino a quota crociera e temperature di -40 °C
- Generazione nuvole con gocce di dimensioni $5\div 300\ \mu\text{m}$
- Verifica efficacia sistemi di protezione e rilevamento
- Studio degrado prestazioni e altre conseguenze

CFD

- Ansys FENSAP-ICE
- ### ADDESTRAMENTO PILOTI

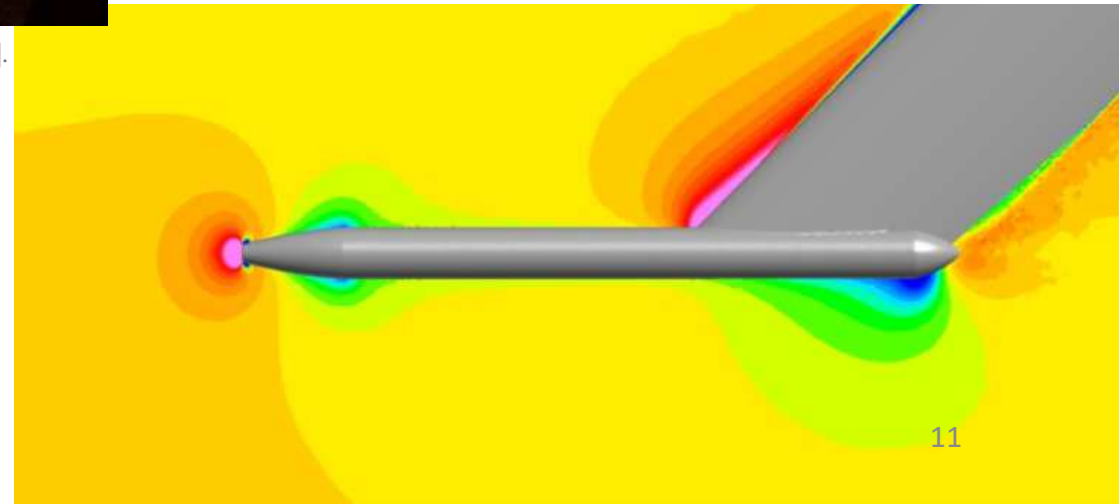


Fig 30: simulazione con il programma Ansys FENSAP-ICE [30]

Chiesa, S. (2018). *Impianto pneumatico, condizionamento, anti-ghiaccio e A.P.U.* Roma: casa editrice CULT.

Graziani, G. (2010). *Aerodinamica*. Roma: casa editrice: Feltrinelli

Casarosa, C. (2014) *Meccanica del volo*. Pisa: casa editrice: Feltrinelli

M.B Bragg, A.P. Broeren, L.A. Blumenthal. (2005) *Progress in aerospace science 2005 Iced-airfoil aerodynamics*,

Rausa, A. Donizetti, A. Guardone A. (2022) *Journal of Computational and Applied Mathematics Multi-physics simulation of 3D in-flight ice-shedding*.
Milano: Politecnico di Milano

Abdelghany, E. S. Farghaly, M. B Almalki, M. M. Sarhan, H. H. El-sayed, M. (2023) *Machine learning and IoT trends for Intelligent Prediction of Aircraft Wing Anti-Icing System Temperature*. Basilea, Svizzera

Zilio, C. Patricelli, L. (2013) *Applied Thermal Engineering, Aircraft anti-ice system: Evaluation of system performance with a new time dependent mathematical mode*. Padova: Università di Padova

Ocretti, L. (2020) *Il ghiaccio e gli aerei: problematiche e impianti dedicati*.

<https://www.tuttosulvolo.it/aviazione-civile/limpianto-antighiaccio/>

- [1] <https://www.aviationfile.com/west-caribbean-airways-flight-708/>
- [2] <https://www.alamy.it/foto-immagine-la-british-airways-boeing-777-si-trova-ai-piedi-della-pista-meridionale-mentre-gli-investigatori-continuano-a-stabilire-oggi-cosa-ha-causato-il-malfunzionamento-a-bordo-del-volo-ba038-quando-si-e-avvicinato-all-aeroporto-di-heathrow-109779066.html>
- [3] <https://www.ilpost.it/2015/02/04/aerei-neve-foto-chicago/>
- [5] [22] [23] [24] [25] <https://www.tuttosulvolo.it/aviazione-civile/limpianto-antighiaccio/>
- [4] <https://www.accuweather.com/it/us/texas/satellite>
- [6] [7] Rausa, A. Donizetti, A. Guardone A. (2022) *Journal of Computational and Applied Mathematics Multi-physics simulation of 3D in-flight ice-shedding*. Milano: Politecnico di Milano
- [8] [9] [10] [11] [12] [13] [14] [15] [16] [17] [18] [19] [20] M.B Bragg, A.P. Broeren, L.A. Blumenthal. (2005) *Progress in aerospace science 2005 Iced-airfoil aerodynamics*,
- [21] https://www.corriere.it/scienze/12_giugno_21/rivestimento-antighiaccio-piante-carnivore_e6ecf27a-badf-11e1-9945-4e6ccb7afcb5.shtml
- [21] Filaferro, A. (2003) *Problematiche del volo in condizione di formazione di ghiaccio*. Udine
- [26] [27] Chiesa, S. (2018). *Impianto pneumatico, condizionamento, anti-ghiaccio e A.P.U.* Roma: casa editrice CULT.
- [28] https://commons.wikimedia.org/wiki/Category:De-icing_of_aircraft
- [29] <https://www.cira.it/it/infrastrutture-di-ricerca/icing-wind-tunnel-iwt>
- [30] <https://www.inas.ro/en/ansys-fluids-fensap-ice>