

Università degli Studi di Padova – Dipartimento di Ingegneria Industriale

Corso di Laurea in Ingegneria Aerospaziale

Implicazioni Aerodinamiche e Soluzioni Tecnologiche alla Formazione di Ghiaccio in Volo

Tutor universitario: Prof. Francesco Picano

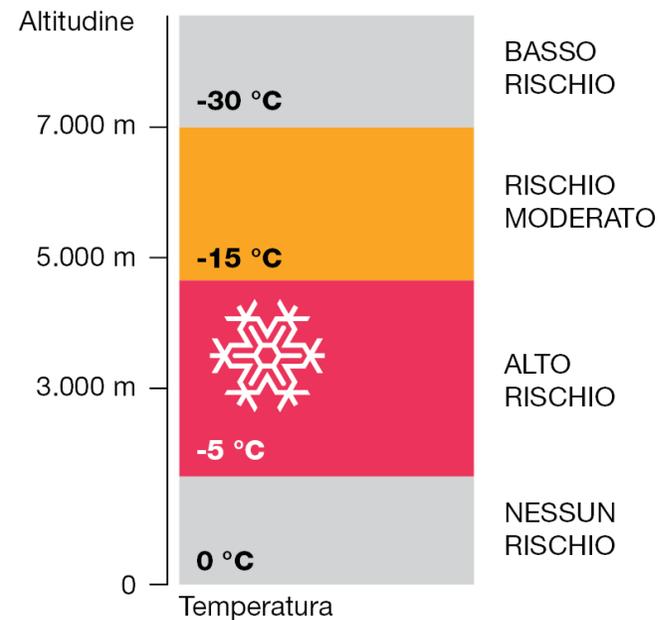
Laureando: *Davide Sbalchiero*

Padova, 14/03/2024

- Capire quali sono le condizioni che portano alla formazione di ghiaccio;
- Analizzare i tipi di ghiaccio che si possono creare sulla superficie di un aeromobile;
- Influenza del ghiaccio sul coefficiente di portanza e resistenza;
- Conseguenze dell'accumulo di ghiaccio su alcune parti dell'aereo;
- Analizzare i sistemi de-icing e anti-icing.

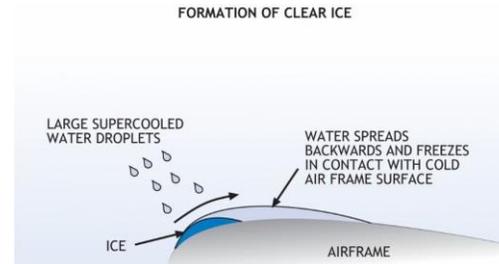
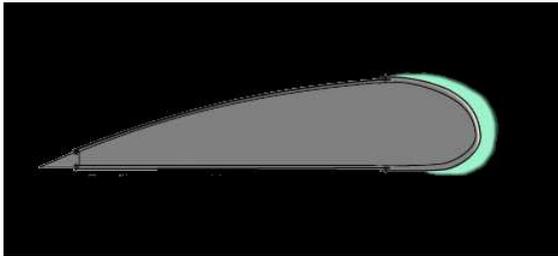
Perché si verifichi la formazione di ghiaccio sugli aeromobili, è necessario che si verifichino alcune condizioni specifiche:

- Quando la temperatura scende al di sotto dello zero;
- Per formare il ghiaccio, è essenziale che ci sia acqua presente nell'aria;
- Un altro fattore significativo possono essere i movimenti verticali dell'aria verso l'alto;
- La dimensione delle gocce d'acqua;
- Oltre agli aspetti meteorologici, anche le specifiche tecniche dell'aeromobile svolgono un ruolo importante.



Il ghiaccio che si deposita sulla superficie dell'aereo assume varie forme ed aspetti che dipendono dalle condizioni ambientali incontrate durante il volo. Esistono comunque 4 tipi di ghiaccio: il ghiaccio brinoso (frost), il ghiaccio granuloso o opaco (rime), il ghiaccio vetrone o trasparente (clear o glaze ice) e il ghiaccio misto (mixed ice).

• Ghiaccio vetrone o vetroso



- Aspetto: trasparente, duro e resistente alla rimozione;
- Genesi: per sopraffusione;
- Icing: lento;
- Quando si forma: in presenza di grandi droplets sopralfuse ma con temperatura superficiale dell'aereo di poco sotto zero;
- Effetti: modifica dell'aerodinamica e del peso dell'aereo.

• Ghiaccio granuloso

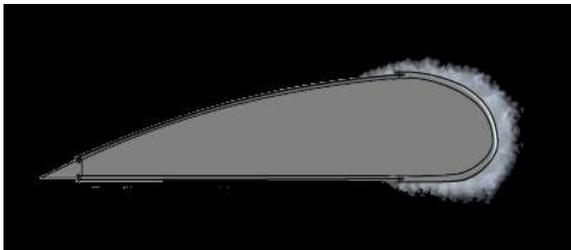
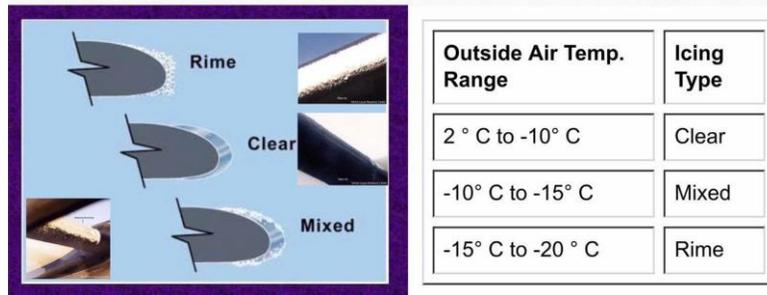
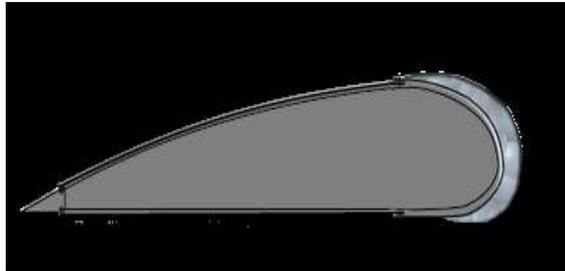


Fig. 2.2.a. Rime ice on a wing of an aeroplane (NASA - Lewis Research Center)



- Aspetto: opaco, fragile e ruvido;
- Genesi: per sopralfusione;
- Icing: rapido;
- Quando si forma: nell'impatto con droplets sopralfuse di piccole dimensioni;
- Effetti: modifica l'aerodinamica delle superfici e il flusso d'aria in entrata nel motore.

- **Ghiaccio misto**



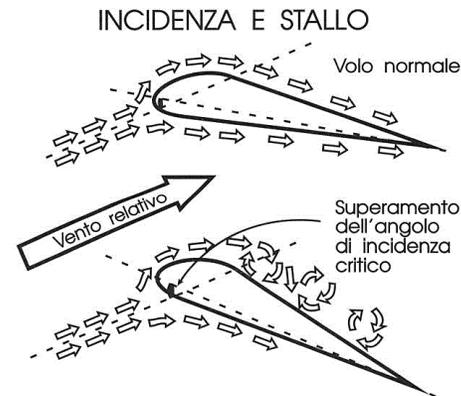
- ❑ **Aspetto:** è una combinazione tra rime ice e clear ice, quindi duro e rugoso;
- ❑ **come si forma:** ognuno dei due tipi di ghiaccio, si forma nell'attraversamento di strati nuvolosi sovrapposti entro i quali prevalgono gocce piccole alternati a strati entro i quali sono prevalenti invece gocce grandi.

- **Ghiaccio brinoso**



- ❑ **Aspetto:** come la brina;
- ❑ **Genesi:** per sublimazione
- ❑ **Quando si forma:** a temperatura sotto zero in presenza di aria molto umida;
- ❑ **Effetti:** durante l'atterraggio riduce la portanza in decollo può favorire l'attecchimento di altro ghiaccio qualora l'aereo penetri in nubi sovrapposte.

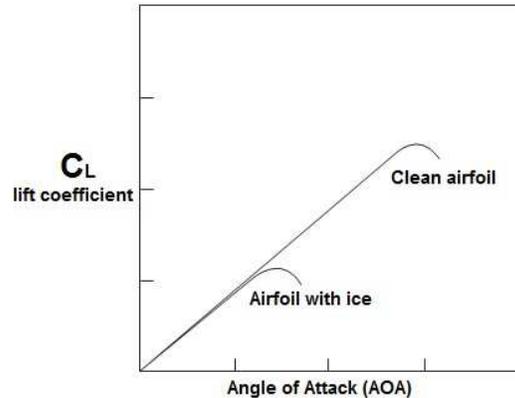
Lo stallo in un aereo si verifica quando l'angolo d'attacco dell'ala supera un certo punto critico, noto come angolo di stallo. L'angolo d'attacco è l'angolo formato tra la corda dell'ala (una linea immaginaria dal bordo d'entrata al bordo d'uscita) e la direzione del flusso d'aria circostante.



Di seguito è riportata la formula della portanza: $L = w_{MAX} = \frac{1}{2} \rho_0 V^2 S C_{L_{MAX}}$

Da cui possiamo ricavarci la velocità di stallo: $V_s = \left(\frac{w_{MAX}}{\frac{1}{2} \rho_0 S C_{L_{MAX}}} \right)^{1/2}$

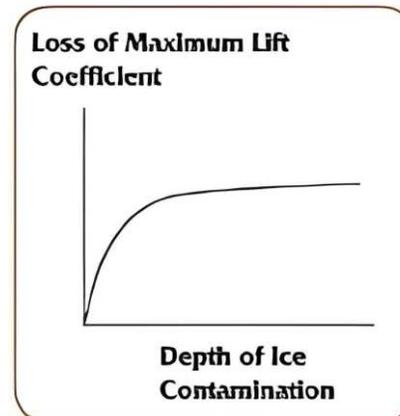
La seguente figura, detta polare di portanza, mostra come il ghiaccio influisce sul coefficiente di portanza per un profilo alare.



Dal grafico possiamo notare che in entrambe le situazioni:

- Regione Lineare (Pre-Stallo);
- Stallo;
- Post-Stallo.

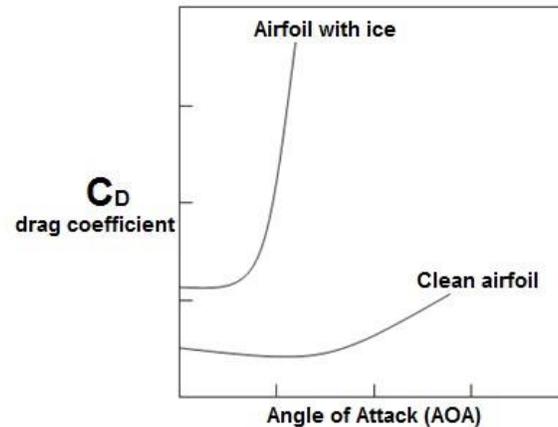
La seguente figura illustra l'effetto dell'aumento dello spessore di ghiaccio sulla perdita del coefficiente di portanza massimo.



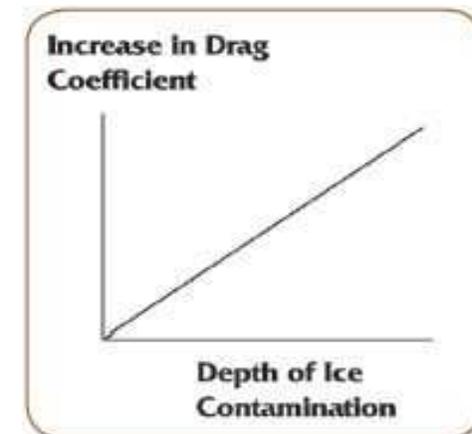
La resistenza totale di un aeromobile è la forza aerodinamica che agisce in direzione opposta al moto dell'aeromobile attraverso l'aria. La formula generale per la resistenza totale è: $D = D_{\text{forma}} + D_{\text{profilo}} + D_{\text{indotta}} + D_{\text{parassita}}$

In forma matematica più dettagliata, la resistenza totale può essere rappresentata come: $D = \frac{1}{2} \rho V^2 A \Sigma C_D$

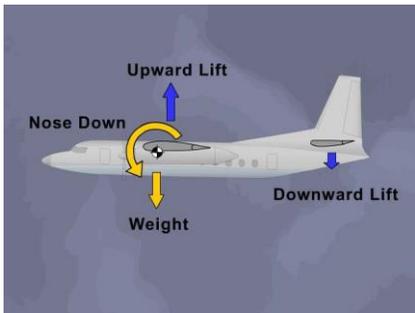
La figura che segue mostra come il ghiaccio influisce sul coefficiente di resistenza del profilo alare.



La figura illustra come un aumento della profondità del ghiaccio fa variare il coefficiente di resistenza



- **Controllo del rollio:** L'effetto del ghiaccio sul controllo del rollio è una questione critica nella sicurezza aerea, poiché può influire sulla capacità dell'aereo di mantenere la sua stabilità e manovrabilità. Ecco alcune considerazioni sugli effetti del ghiaccio sul controllo del rollio: aumento del peso e dell'inerzia, variazione di profilo, stallo locale, perdita di controllo.
- **Tailplane icing:** "Tailplane icing" si riferisce all'accumulo di ghiaccio sulla parte posteriore di un aeromobile, comunemente nota come stabilizzatore orizzontale o piano di coda. In riferimento al piano di coda ci concentriamo ora sulla forza aerodinamica detta "downward lift".



Questa forza generata dall'impennaggio orizzontale di un aeromobile, che agisce in direzione verso il basso è cruciale per il controllo dell'assetto dell'aeromobile durante il volo.

- **Tailplane stall**

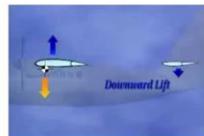


Figure 1. Tail Down Force Balancing Wing Moment

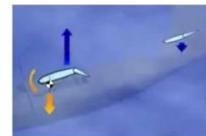


Figure 2. Increased Pitching Moment with Flap Extension

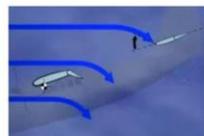


Figure 3. Increased Down-Wash on Tail Plane from Flap Extension

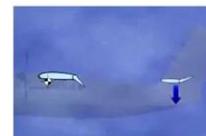


Figure 4. Increased Tail Down Force with Flaps Extended



Figure 5. Typical Icing Accumulation on Leading Edges

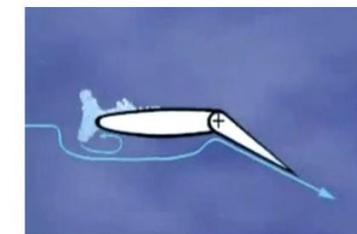


Figure 6. Elevator Forced Down into Low Pressure Area

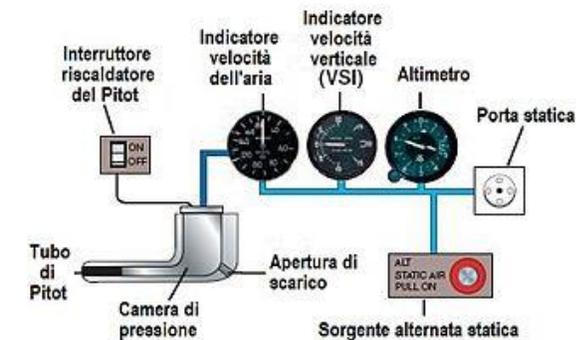
- **Ghiaccio sull'elica**
 - Perdita di prestazioni
 - Squilibrio dell'elica
 - Aumento del carico sul motore
 - Perdita di controllo
- **Ghiaccio sulle antenne**
 - Vibrazioni
 - Distorsioni dei segnali radio
 - Gravi danni strutturali

- **Ghiaccio sulle prese d'aria dei motori**
 - Riduzione del flusso d'aria
 - Perdita di potenza
 - Aumento del rischio di stallo del motore
 - Possibile danno strutturale

- **Ghiaccio sul tubo di pitot:** Il tubo di pitot è un elemento del sistema pitot-statico. Quest'ultimo ha la funzione di determinare la velocità dell'aria, il numero di Mach e l'altitudine. Un sensore di questo tipo è costituito da un tubo con un foro sulla parte anteriore, allineato con la direzione del movimento, e un secondo foro posizionato lateralmente sul tubo.



$$q = \frac{1}{2} \rho V^2 = P_s - P_a$$



Alcuni dei danni e dei problemi che possono derivare dalla presenza di ghiaccio su un tubo di Pitot includono: Misurazioni errate della velocità indicata, Rischio di stallo, Misurazioni errate dell'altitudine.

- **Ghiaccio sulle alette indicatrici di incidenza**
- **Ghiaccio alla sonda EPR**
- **Ghiaccio sul parabrezza**
 - Aeromobili ad Alte Prestazioni
 - Aeromobili a Quote e Velocità Inferiori
- **Formazione di ghiaccio al suolo**

De-icing

Anti-icing

L'anti-icing è una fase cruciale per prevenire la formazione di ghiaccio sulle superfici degli aeromobili. In questa fase, si utilizzano miscele a temperatura ambiente contenenti acqua e fluidi di tipo II, III o IV. L'obiettivo è evitare che il ghiaccio si riformi. La protezione garantita da questo trattamento dura fino a quando l'aeromobile inizia la corsa di decollo.

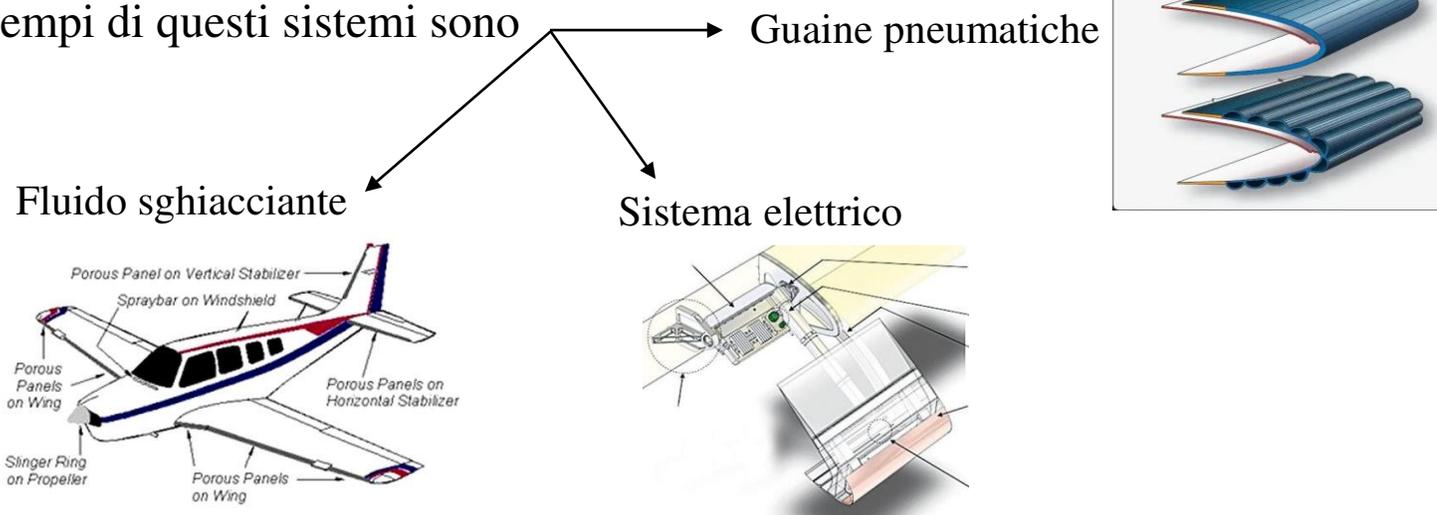
Può essere eseguito in vari modi: con spazzole o raschietti meccanici, applicando calore o utilizzando fluidi specifici che abbassano il punto di congelamento dell'acqua.



La protezione dal ghiaccio è fondamentale per garantire la sicurezza e l'efficienza dei voli, soprattutto durante condizioni meteorologiche avverse. Alcuni dei principali metodi di protezione dal ghiaccio utilizzati in aviazione includono:

- **De-icing systems:** Questa tipologia di sistemi sono utilizzati per l'eliminazione del ghiaccio formatosi sul velivolo quando l'accumulo supererà una certa soglia di spessore.

Alcuni esempi di questi sistemi sono



- **Anti-icing systems:** I sistemi anti-icing sono progettati per essere attivati prima di incontrare condizioni di formazione del ghiaccio.



- **MSG Aviation:** La società norvegese MSG Aviation, specializzata nello sghiacciamento degli aerei, ha annunciato che sta costruendo il robot di sghiacciamento più grande del mondo presso l'aeroporto di Oslo.



- **Helios Ice Protection:** Questo sistema utilizza uno strato di grafite riscaldato incorporato in un bordo d'attacco in composito termoplastico per proteggere gli aeromobili dal ghiaccio. La particolarità di questa tecnologia risiede nella superiore conducibilità termica della grafite, che consente di generare calore in modo più rapido rispetto ai sistemi tradizionali di protezione dal ghiaccio.

