



POLITECNICO
MILANO 1863

SCUOLA DI INGEGNERIA INDUSTRIALE
E DELL'INFORMAZIONE

Morphogenetic algorithm for ice accretion

TESI DI LAUREA MAGISTRALE IN INGEGNERIA AERONAUTICA

Author: **Alessandro Bruseghini**

Student ID: 919786

Advisor: Prof. Alberto Guardone

Academic Year: 2020-2021

Abstract

This thesis presents the morphogenetic algorithm devised by Szilder to perform numerical simulations of ice formation and accretion.

This algorithm aims to overcome the limitations of pre-existing models which, due to the numerous simplifying hypotheses necessary to solve the complex set of equations describing an icing problem, allowed to obtain satisfactory results but only in a limited set of external atmospheric conditions and geometries of the body on which the phenomenon of ice accretion occurred.

The morphogenetic model proposes a different approach to the problem of ice accretion, wanting to mimic the natural behavior of particles from the impact of the liquid particles on the body until the phase change.

In the thesis will also compare the numerical results of this model with the experimental data obtained from problems presented by AIAA during the "1st Ice Prediction Workshop" of 26-29 July 2021, to verify the validity of the morphogenetic model in the predictions of the quantity and shape of the ice formed.

Keywords: Morphogenetic, Ice accretion, Szilder, PoliMIce

Abstract in lingua italiana

Nella presente tesi verrà esposto l'algoritmo morfogenetico, ideato da Szilder, per effettuare simulazioni numeriche di formazione e accrescimento di ghiaccio.

Tale algoritmo vuole superare i limiti dei modelli preesistenti che a causa delle numerose ipotesi semplificative, necessarie per risolvere il complesso set di equazioni che descrivono un problema di ghiacciamento, permettono di ottenere risultati soddisfacenti solamente in un set limitato di condizioni atmosferiche esterne e geometriche del corpo su cui si verifica il fenomeno dell'accrescimento di ghiaccio.

Per ottenere tale risultato, il modello morfogenetico propone un diverso approccio al problema dell'accrescimento di ghiaccio volendo mimare il comportamento naturale delle particelle dal momento del loro impatto sul corpo fino al ghiacciamento.

Nella tesi verranno inoltre confrontati i risultati numerici di tale modello con i dati sperimentali ricavati dai problemi presentati al 1st ice accretion workshop AIAA per verificare la bontà di tale modello nelle previsioni della quantità e forma di ghiaccio formatosi.

Parole chiave: Morfogenetico, Accrescimento ghiaccio, Szilder, PoliMIce

Indice

Abstract	i
Abstract in lingua italiana	iii
Indice	v
1 Introduzione	1
1.1 Accrescimento di ghiaccio: fenomenologia	4
1.2 Tipologie di ghiaccio	4
1.2.1 Rime ice	4
1.2.2 Glaze ice	5
1.2.3 Mixed ice	6
1.3 Fattori fondamentali nell'accrescimento di ghiaccio	6
1.3.1 Collection efficiency	6
1.3.2 LWC	8
1.3.3 Temperatura	9
1.3.4 Dimensioni delle particelle	10
1.3.5 Velocità asintotica	11
1.4 Dispositivi antighiaccio	12
1.5 Scopo e struttura della tesi	14
2 Ice accretion simulation	15
2.1 Modelli di accrescimento di ghiaccio	15
2.1.1 Stefan problem	15
2.1.2 Modello di Messinger	17
2.1.3 Modello di Myers	19
2.1.4 Modello di Meyrs modificato	22
2.2 PoliMIce	23

2.2.1	Cfd	24
2.2.2	Particle Tracking	25
2.2.3	Icing	26
3	Morphogenetic model	29
3.1	Sviluppi ulteriori	36
4	Risultati	39
5	Conclusione	53
	Bibliografia	55
	Elenco delle figure	57
	Elenco delle tabelle	59

1 | Introduzione

Quando un velivolo, durante la sua vita operativa, attraversa zone in cui sono presenti gocce d'acqua sottoraffreddate, può verificarsi che sulla sua superficie si formi del ghiaccio. La formazione e l'accrescimento di ghiaccio sono due fenomeni di fondamentale importanza in campo aeronautico in quanto possono compromettere il corretto funzionamento di numerose componenti e di conseguenza compromettere la sicurezza dei passeggeri durante il volo; esempi recenti di incidenti con conseguente perdita di vite umane sono l'ATR-72 nel '94 (68 morti), l'EMB-120 nel '97 (29 morti) e il *Bombardier* DHC-8-400 nel 2009 (50 morti).



Figura 1.1: Incidente del volo West Wind Aviation 282 nel Dicembre 2017

Risulta pertanto evidente la centralità dello studio di tali fenomeni e l'attenta considerazione da porvi durante la progettazione di aeromobili per garantire il corretto funzionamento dell'intero sistema velivolo e garantire la salvaguardia di vite umane. A tal proposito alla progettazione di aeromobili vengono imposti stringenti requisiti di sicurezza da parte degli

enti certificatori (FIKI certification – Flight Into Known Icing).

La formazione di ghiaccio sul velivolo può generare molteplici criticità durante il volo: innanzitutto il verificarsi di tale fenomeno sulle superfici aerodinamiche provoca una variazione della forma delle stesse con conseguente degradazione delle prestazioni aerodinamiche; questo si traduce in una riduzione delle capacità portanti del velivolo, l'anticipo dello stallo e un incremento della componente di resistenza che si ripercuote sul consumo di carburante.

Altri aspetti fondamentali riguardano l'aumento di peso con conseguente aggravio strutturale, problemi di stabilità e manovrabilità del velivolo dovuto alla formazione di ghiaccio sulle superfici di controllo e sui loro cinematismi di movimentazione, malfunzionamento dei sensori con conseguenti informazioni errate ai piloti riguardo le condizioni del velivolo. Inoltre la formazione di ghiaccio sulle gondole dei propulsori può portare al loro malfunzionamento; innanzitutto si può avere una riduzione della sezione di ingresso, un aggravio strutturale sui vari componenti ed infine si può verificare distacco ed ingestione di blocchi di ghiaccio provocando rottura di componenti interne (es. palette del compressore) con conseguente perdita totale dei motori.



Figura 1.2: Un A-10 Thunderbolt II (a sinistra) e un KC-135 Stratotanker (a destra) durante una prova in volo di accrescimento di ghiaccio. In alto un T-38 Talon fotografa l'esperimento in volo (foto: U.S. National Archives)

Da quanto detto, risulta pertanto evidente l'importanza degli sforzi fatti nel corso dell'ultimo secolo per riuscire ad avere una comprensione sempre più accurata di tale fenomeno, al fine sviluppare modelli che permettano una sempre migliore capacità predittiva e consentire la progettazione di dispositivi sempre più efficienti atti a contrastarlo.

La ricerca in tale ambito cominciò agli inizi degli anni '20, basata solamente su prove sperimentali atte a studiare l'effetto sulle prestazioni aerodinamiche dei profili in presenza di ghiaccio.

A partire dalla fine degli anni '70, alla NASA, cominciarono le prime campagne di simulazione computazionale sul fenomeno dell'icing su profili e, a seguito dell'incidente aereo del '94 precedentemente citato, lo studio dell'accrescimento di ghiaccio diventò di fondamentale importanza anche a livello industriale per la sicurezza dei passeggeri.

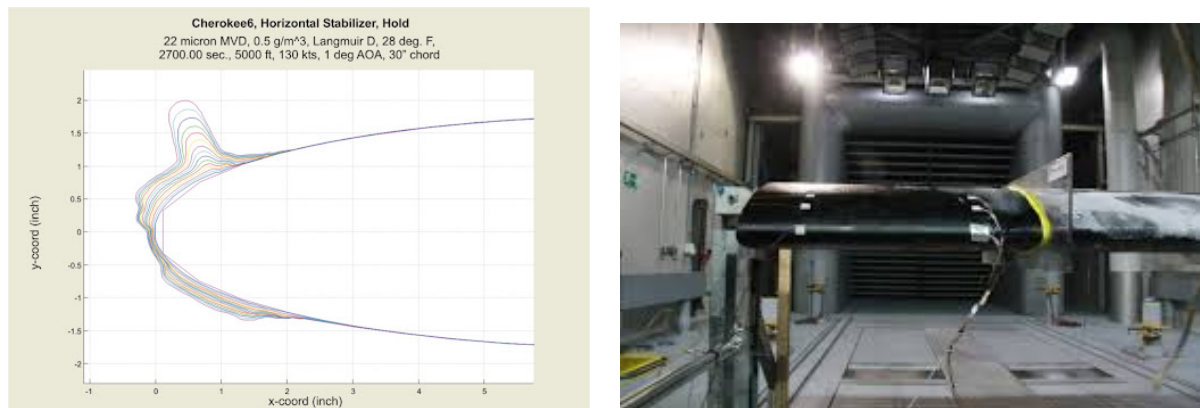


Figura 1.3: *Ice accretion: a sinistra viene mostrata una simulazione numerica su profilo alare, mentre a destra è presente una prova sperimentale per testare il funzionamento di dispositivi anti-ghiaccio*

Oggi giorno, sebbene modelli sempre più raffinati e potenze di calcolo crescenti permettano di ottenere previsioni sempre più accurate in numerose condizioni di volo, esistono comunque condizioni in cui i modelli computazionali hanno bisogno di ulteriori sviluppi e pertanto lo standard prevede l'affiancamento di questi a prove sperimentali in volo (Fig.1.2).

1.1. Accrescimento di ghiaccio: fenomenologia

Quando un aereo attraversa una regione in cui sono presenti particelle d'acqua sottoraffredate, ovvero una nuvola, si può avere formazione di ghiaccio.

In particolare, le particelle d'acqua, a causa delle piccole dimensioni, possono rimanere allo stato liquido anche al di sotto della temperatura di solidificazione nella condizione di liquido sottoraffreddato. Quando tali particelle, che si trovano in condizione metastabile, impattano sulla superficie del velivolo, possono andare incontro a solidificazione istantanea formando il cosiddetto *rime ice*; una parte di esse, invece, può rimanere ancora sottoforma di liquido muovendosi lungo la superficie e congelando, eventualmente, successivamente formando il *glaze ice*.

Sebbene quanto descritto sia la condizione più comune per l'accrescimento di ghiaccio in volo, esistono anche altre condizioni atmosferiche che portano ad avere ghiaccio quali condizioni di pioviggine o neve.

La quantità e velocità di ghiaccio che si va a formare sulla superficie di un velivolo dipende da vari fattori quali: la quantità d'acqua presente in atmosfera, le dimensioni delle particelle, la temperatura, la velocità del velivolo, la forma delle superfici e il livello di rugosità delle stesse. L'influenza di questi fattori verrà analizzata dettagliatamente nel seguito del capitolo.

1.2. Tipologie di ghiaccio

A seconda delle condizioni atmosferiche, il processo di formazione di ghiaccio può portare a strutture con differenti caratteristiche. In campo aeronautica le principali tipologie di ghiaccio che possono formarsi sono il *rime ice*, il *glaze ice* e il *mixed ice*.

1.2.1. Rime ice

Il *rime ice* è una tipologia di ghiaccio caratterizzata da un colore biancastro opaco costituito dal deposito di granuli discreti di ghiaccio formati da un rapido ghiacciamento delle gocce di liquido sottoraffreddato una volta impattato il profilo. La Fig.1.3 mostra un esempio di formazione di *rime ice* su un modello di galleria.

Tale tipologia di ghiaccio si forma principalmente a temperature inferiori a 273, bassa velocità, piccole particelle e contenuto d'acqua basso all'interno della nuvola.

La sua densità è piuttosto bassa, circa 880 kg/m^3 , inferiore a quella del *glaze ice*; questo è dovuto alla presenza di bolle d'aria all'interno della struttura derivanti dal rapido

ghiacciamento delle particelle di liquido a seguito dell'impatto.

La struttura del rime ice è piuttosto regolare e abbastanza fragile; pertanto può essere facilmente rimossa.



Figura 1.4: *Rime ice formatosi su di un modello di galleria*

1.2.2. Glaze ice

Il glaze ice è una formazione di ghiaccio che si ottiene a temperature più elevate (vicino alla temperatura di solidificazione dell'acqua), alta velocità ed elevato contenuto d'acqua all'interno della nuvola.

Si forma dal ghiacciamento delle gocce d'acqua successivamente rispetto al punto di impatto. Queste una volta impattato tendono a muoversi lungo il profilo fino al loro completo ghiacciamento.

Il risultato è quello di ottenere forme meno regolari, caratterizzate da protuberanze che rovinano notevolmente il campo di moto intorno al profilo. Tale tipologia di ghiaccio è trasparente ed ha una densità maggiore rispetto al rime ice (circa 920 kg/m^3) ed è più resistente rispetto al rime ice e pertanto è di più difficile rimozione.

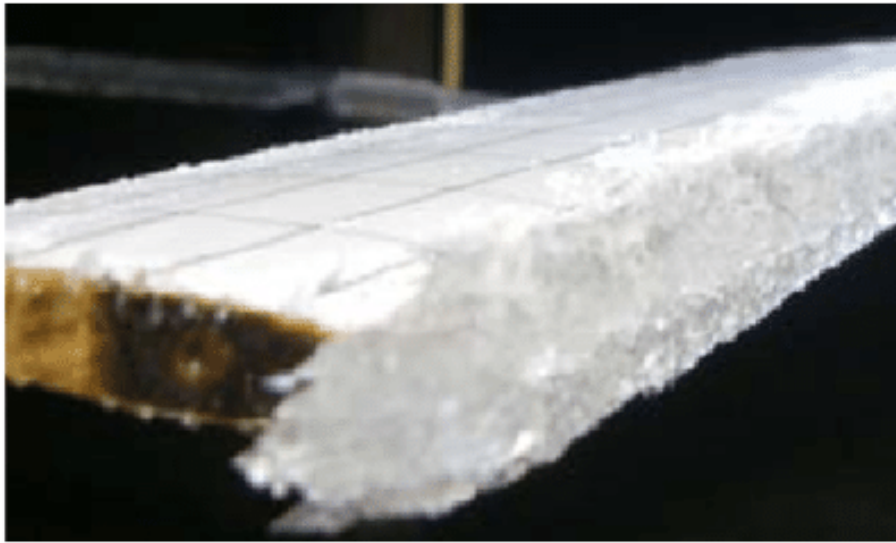


Figura 1.5: *Glaze ice formatosi su di un modello di galleria*

1.2.3. Mixed ice

Il mixed ice è una condizione intermedia tra le due condizioni appena presentate. Si forma in presenza di gocce di dimensioni varie o mescolate con neve. Si forma quando si hanno repentine variazioni nelle condizioni atmosferiche e di volo.

1.3. Fattori fondamentali nell'accrescimento di ghiaccio

Ci sono numerosi fattori che influenzano la formazione e la tipologia di ghiaccio che si andrà a formare sulle superfici di un velivolo; tali fattori comprendono le condizioni ambientali (in termini di temperatura, contenuto d'acqua e dimensione delle particelle), il campo di moto che si sviluppa intorno al corpo, la rugosità superficiale, la velocità di volo.

Verranno ora descritti più nel dettaglio alcuni di questi fattori fondamentali propri dei problemi di accrescimento di ghiaccio.

1.3.1. Collection efficiency

Il primo parametro fondamentale nell'accrescimento di ghiaccio, legato direttamente al rateo di accrescimento, è la collection efficiency indicata tipicamente con β . Tale parametro rappresenta il rapporto tra la frazione di acqua impattante su una superficie elementare

del corpo e la quantità totale di acqua presente nella corrente indisturbata a monte. Pertanto è un parametro di fondamentale importanza perché rappresenta fisicamente la quantità d'acqua impattante sul profilo che potrà, successivamente, andare incontro a ghiacciamento.

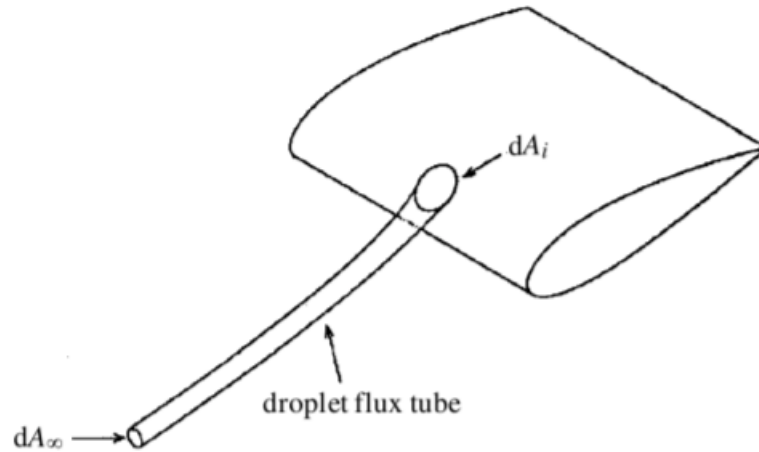


Figura 1.6: *Collection efficiency: definizione per geometria tridimensionale*

Esistono varie formulazioni matematiche per calcolare la collection efficiency; riferendosi alla Fig. 1.6 si definisce come rapporto tra l'area all'infinito e l'area sulla superficie del corpo racchiuse all'interno dello stesso tubo di flusso delle particelle.

$$\beta = \frac{dA_\infty}{dA_i} \quad (1.1)$$

La collection efficiency ha tipicamente un andamento mostrato nella Fig. 1.7; si può notare la presenza di un picco (circa 0.7-0.8) vicino al punto di ristagno sul profilo e una decrescita sino a zero definendo la cosiddetta regione di impatto.

Elevati valori di tale parametro corrispondono ad elevate velocità di accrescimento di ghiaccio.

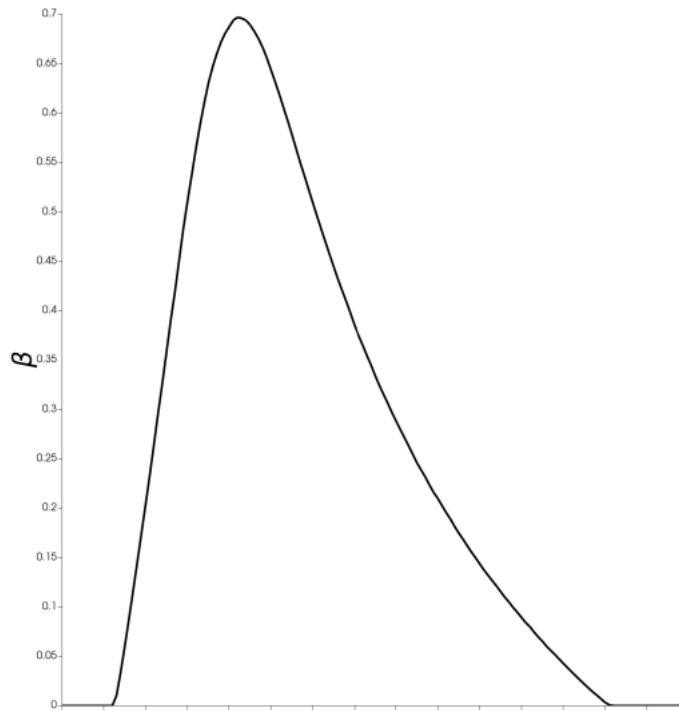


Figura 1.7: Esempio di andamento della collection efficiency

1.3.2. LWC

Un altro parametro fondamentale che influenza sia la tipologia di ghiaccio che si andrà a formare e la sua velocità di accrescimento è LWC, ovvero il liquid water content. Tale parametro esprime la massa d'acqua presente (espressa in grammi) per metro cubo d'aria. Tanto maggiore è il contenuto d'acqua, tanto maggiore sarà la probabilità di avere grosse quantità di ghiaccio.

L'LWC ha un'elevata variabilità ed è influenzato da numerosi fattori. Innanzitutto assume valori superiori nelle nuvole di tipo convettivo rispetto a quelle stratiformi, aumenta con la quota e aumenta all'aumentare della temperatura presente alla base della nuvola. Valori tipici che assume il LWC sono nell'intorno di $0.002 - 0.03 \text{ g/m}^3$ per cirri fino $1 - 3 \text{ g/m}^3$ per cumulolembi [10].

Un fattore non particolarmente influenzante l'LWC è la posizione geografica; se la nuvola si trova al di sopra di una zona continentale presenterà tipicamente un numero maggiore di gocce, ma di dimensioni inferiori rispetto alle nuvole presenti su zone marine dove invece si avranno meno gocce ma di maggiori dimensioni ottenendo così valori paragonabili.

Nella figura 1.8 viene mostrata la probabilità di formazione di ghiaccio in base al liquid water content; tali valori sono stati ottenuti mediante oltre mille ore di prove sperimentali

in volo effettuate dalla *University of Wyoming's research aircraft*[10].

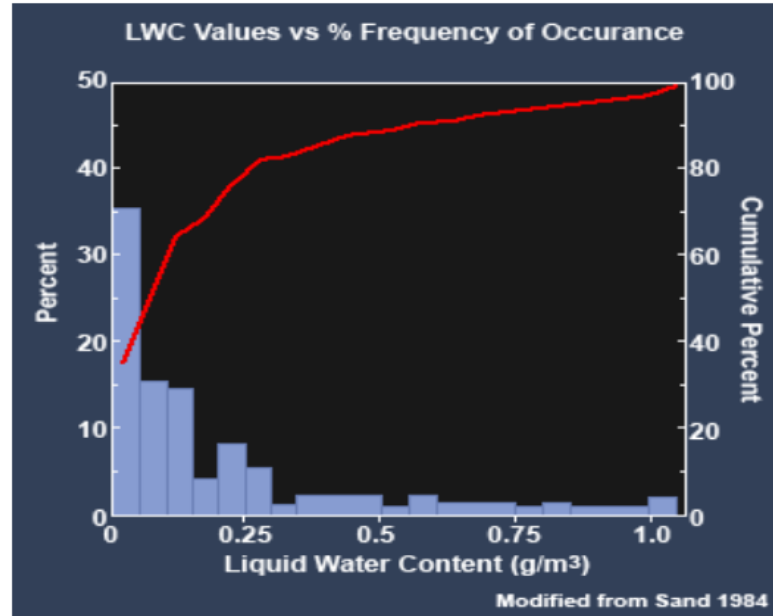


Figura 1.8: *Frequenza relativa e cumulata di ghiacciamento delle particelle in funzione del LWC*[10]

1.3.3. Temperatura

La temperatura è, naturalmente, uno dei parametri fondamentali nel fenomeno dell'icing. La seguente tabella [10] mostra il rischio di avere tale fenomeno in funzione della temperatura e del tipo di nuvola nel quale si vola:

In-flight icing risk	Cumulus clouds	Stratiform clouds	Rain and drizzle
High	0° to -20°C	0° to -15°C	0° and below
Medium	-20°C to -40 °C	-15°C to -30°C	
Low	0° < than -40°C	< than -30°C	

Tabella 1.1: *In-flight icing risk in various atmospheric conditions* [4]

Riguardo quanto appena detto, a seguito di numerosi studi svolti su incidenti aerei dovuti al fenomeno dell'icing, si ha che:

“the worst continuous icing conditions are found near the freezing level in heavy stratified clouds, or in rain, with icing possible up to 8,000 ft higher. Icing is rare above this higher altitude as the droplets in the clouds are already frozen. In cumuliform clouds with strong updrafts, however large water droplets may be carried to high altitudes and structural icing is possible up to very high altitudes. Further, in cumuliform cloud the freezing level may be distorted upwards in updrafts and downwards in downdrafts, often by many thousands of feet. This leads to the potential for severe icing to occur at almost any level.” (Aircraft Icing Handbook[4])

1.3.4. Dimensioni delle particelle

La dimensione delle particelle viene espressa mediante il *mean volume diameter* o *MVD*. L'MVD, come dice il nome, rappresenta il valore medio della dimensione delle particelle presenti all'interno di una nuvola.

La dimensione delle particelle riveste un ruolo importante nel processo di formazione di ghiaccio in quanto tanto maggiore è la dimensione della particella e tanto più la particella tende a seguire una traiettoria rettilinea, a causa della sua maggiore inerzia, e quindi subire meno il campo aerodinamico.

Valori tipici della MVD sono tra i $10 \mu m$ e i $50 \mu m$. L'MVD è influenzato dalla temperatura; tanto minore è la temperatura ambiente e tanto più le particelle tendono a ridursi in dimensione.

Esistono delle condizioni particolari, in termini di dimensioni delle particelle, che hanno portato nel corso degli anni a numerosi incidenti; tali particelle prendono il nome di *supercooled large droplets* o *SLD*. Queste particelle hanno diametri che possono arrivare a 10 volte la condizione normale descritta precedentemente ovvero arrivare intorno ai $500 \mu m$ di dimensione.

Il problema di particelle di queste dimensioni risiede nel fatto che possono impattare più facilmente oltre la zona dove sono presenti i sistemi anti-ghiaccio, tipicamente posti nella zona di bordo d'attacco. Pertanto queste particelle portano a formazione di ghiaccio che, a causa della sua posizione, non riesce ad essere rimosso e che, accrescendosi rapidamente, porta ad una rapida degradazione delle prestazioni aerodinamiche e problemi di controllabilità del velivolo. Risulta evidente che tali condizioni rappresentano una condizione di volo di forte rischio.

La formazione di tali particelle deriva principalmente da due fattori: inversione termica

e un processo di collisione-coalescenza delle particelle. Tali condizioni si verificano tipicamente al di sotto dei 12 mila piedi di quota e per una banda tipicamente di 3 mila piedi; però non sono rari i casi in cui si è osservato questo fenomeno anche a quote superiori [1].

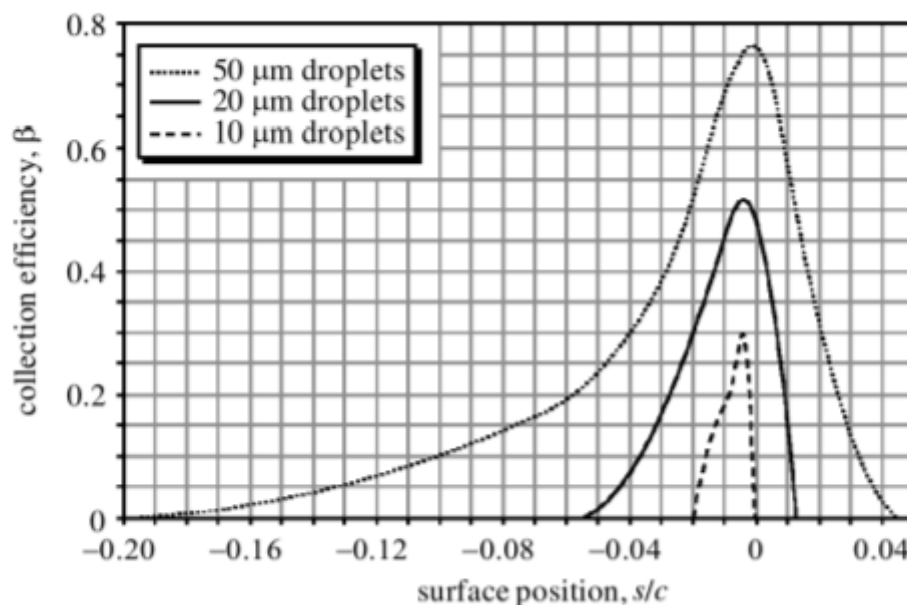


Figura 1.9: *Collection efficiency in funzione del MVD [7]*

1.3.5. Velocità asintotica

La velocità con cui il velivolo si muove è di fondamentale importanza in quanto, naturalmente, tanto più velocemente esso si muove e tante più particelle d'acqua potrà incontrare durante il suo movimento e di conseguenza aumenterà la quantità d'acqua raccolta che potrà ghiacciarsi sul corpo.

In realtà il legame tra la velocità di volo e la formazione di ghiaccio presenta un legame più complesso. Un esempio risiede nel fatto che aumentando la velocità di movimento del corpo, ovvero l'energia cinetica delle particelle, si genera un maggior riscaldamento della superficie che riduce la formazione di ghiaccio. Tale effetto risulta del secondo ordine rispetto alla massa d'acqua raccolta ma comunque complica il legame tra le due grandezze.

1.4. Dispositivi antighiaccio

Si sono sviluppati numerosi dispositivi per contrastare il problema della formazione del ghiaccio durante il volo con lo scopo di garantire la sicurezza dei passeggeri.

I dispositivi in tale campo si dividono in due macro categorie:

- Dispositivi anti-icing: sono dispositivi che vengono attivati prima che il velivolo entri in una zona con condizioni favorevoli alla formazione di ghiaccio per prevenirne la formazione sulle superfici dove sono installati. Hanno il grosso vantaggio di permettere di ottenere superfici aerodinamiche sempre pulite senza degradazione delle performance aerodinamiche, ma richiedono un notevole flusso costante di energia, erogata dai propulsori, per il funzionamento durante una qualsiasi fase di volo.

I dispositivi più utilizzati in questa categoria sono dispositivi termici che sfruttano il calore ottenuto mediante resistenze elettriche o attraverso l'utilizzo di aria calda prelevata dal compressore per riscaldare le superfici. Un'altra tecnica utilizzata consiste nel cospargere sulle superfici esterne del velivolo dei particolari liquidi, a base di glicole etilico (il cui utilizzo è sempre più ridotto perché tossico per ingestione e con notevole impatto ambientale) o di glicole propilenico (non tossico ma impatta sulla vita acquatica).

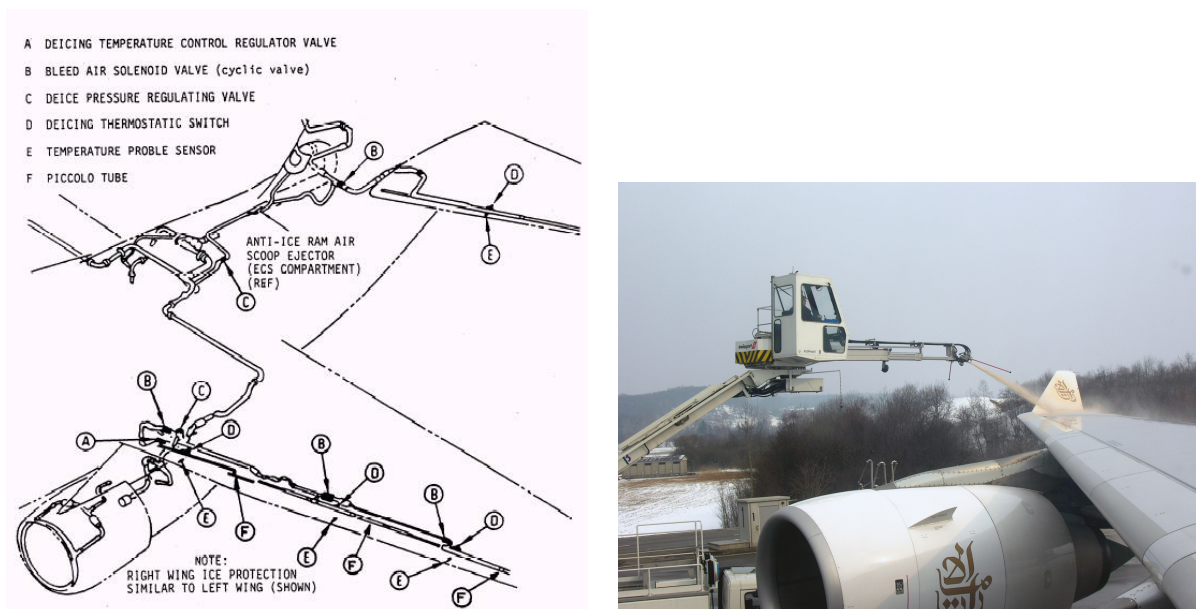


Figura 1.10: Sistemi antighiaccio [3]

- Dispositivi di de-icing: sono dispositivi che vanno a rimuovere il ghiaccio una volta che questo si è formato sulle superfici del velivolo.

Esistono varie tipologie di dispositivi che fanno parte di questa categoria: meccanici (principalmente pneumatici), elettrici, termici.

Il principale vantaggio di questa categoria di dispositivi risiede nel fatto che il loro utilizzo è sporadico, ovvero vengono attivati solamente per la rimozione del ghiaccio successivamente alla sua formazione; ciò si traduce in una richiesta di energia non continua ai propulsori ed inoltre la loro richiesta energetica è globalmente inferiore anche durante l'utilizzo. Il principale svantaggio risiede nella loro natura; l'aereo opera in condizioni di superfici con presenza di ghiaccio nella maggior parte del tempo (ad eccezione degli istanti successivi alla loro attivazione) che si traduce in una degradazione delle performance del velivolo.

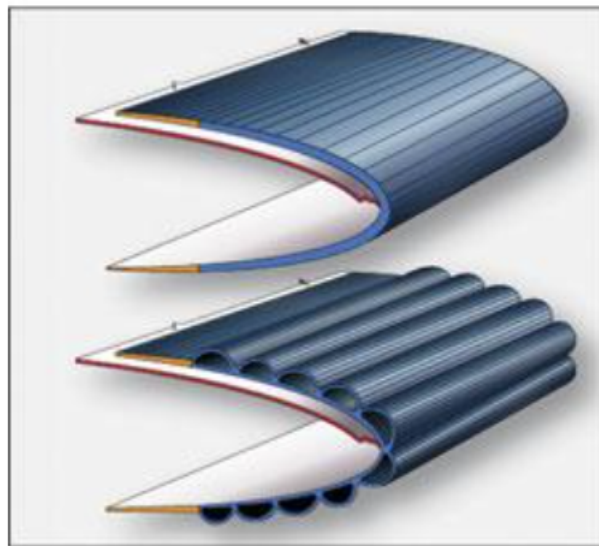


Figura 1.11: Sistema antighiaccio pneumatico [2]

1.5. Scopo e struttura della tesi

A fronte di quanto esposto nei paragrafi precedenti, si evince l'importanza di cercare modelli matematici che permettano di effettuare simulazioni sempre più accurate allo scopo di avere previsioni migliori e consentire la progettazione di dispositivi più efficaci atti a garantire la salvaguardia di vite umane.

Lo scopo di questa tesi è quello di andare ad utilizzare e validare all'interno del framework di lavoro per le simulazioni di formazione e accrescimento di ghiaccio del Politecnico di Milano, ovvero PoliMIce, un nuovo approccio denominato algoritmo morfogenetico.

Nel capitolo 1 si ha una introduzione al problema della formazione e accrescimento di ghiaccio, mostrando la centralità di questo problema all'interno della progettazione di aeromobili per garantire la sicurezza dei passeggeri nonché verrà esposta la fisica dietro tale fenomeno, i parametri fondamentali in gioco, le tipologie differenti di ghiaccio che si possono formare e i diversi dispositivi atti a prevenire e/o eliminare tale fenomeno.

Nel capitolo 2 verranno esposti, in successione cronologica, i modelli matematici per l'accrescimento del ghiaccio, l'implementazione di tali modelli, il framework attuale di lavoro per le simulazioni di ghiaccio utilizzato al Politecnico di Milano, PoliMIce, ed esempi di simulazioni su casi noti.

Nel capitolo 3 verrà introdotto il modello morfogenetico per l'accrescimento di ghiaccio, verrà esposta la sua implementazione all'interno di PoliMIce e verrà confrontato con il precedente modello.

Infine nel capitolo 4 verranno esposti i risultati conseguiti con questo nuovo modello di accrescimento e verranno comparati con dati sperimentali disponibili.

2 | Ice accretion simulation

In questo capitolo verrà, innanzitutto, proposta una rapida panoramica dei modelli matematici sviluppati nel corso degli anni per studiare il fenomeno del passaggio di stato solido-liquido e fare previsioni quantitative riguardo la formazione e accrescimento di ghiaccio sulle varie componenti di un aeromobile.

Tali studi, come visto nel capitolo precedente, sono di fondamentale importanza, e proseguono tutt'oggi, in quanto ottenere previsioni sempre più accurate di tale fenomeno permette una progettazione più consapevole di aeromobili, garantendo maggiormente la sicurezza dei passeggeri, nonché una maggior efficienza di svariate componenti.

Nel capitolo verrà adottata una sequenza cronologica nella presentazione di tali modelli partendo dalla formulazione originale del problema da parte di J.Stefan nel 1889, per poi passare a modelli sviluppati successivamente per il campo aeronautico (Messinger 1953 e Myers 1990) che, mediante ipotesi semplificative, hanno portato a una soluzione di tale problema.

Nella seconda parte del capitolo verrà descritto come il più recente modello matematico è stato implementato all'interno di un codice numerico, denominato PoliMIce, e come esso venga adoperato per effettuare simulazioni numeriche in tale ambito.

2.1. Modelli di accrescimento di ghiaccio

2.1.1. Stefan problem

Tutti i modelli di accrescimento di ghiaccio utilizzati in campo aeronautico (Messinger 1953 e Myers 1990) sono basati sul problema di Stefan [14], ovvero sulla prima formulazione matematica, risalente al 1889, del cambio di fase solido-liquido di una sostanza.

Sebbene Stefan stesse studiando la formazione di ghiaccio presso i mari intorno al circolo polare, il suo modello è applicabile a svariati fenomeni quali la diminuzione di ossigeno all'interno di un muscolo in prossimità di un vaso sanguigno ostruito, la solidificazione dentritica, il passaggio di fase in una lega metallica, le batterie agli ioni di litio, la diffusione di informazioni nei social networks.

Tutti questi problemi, da un punto di vista matematico, appartengono alla famiglia dei *moving boundary value problems* ovvero problemi in cui la posizione di un'interfaccia è incognita, varia nel tempo e dipende dalla soluzione stessa.

Il problema di Stefan, nella sua formulazione classica, descrive il profilo di temperatura di una sostanza bifase solida-liquida, con la dinamica dell'interfaccia solido-liquido influenzata dal flusso di calore dovuto dalla solidificazione o scioglimento.

In particolare il modello di Stefan consiste in un sistema di quattro equazioni differenziali alle derivate parziali che descrivono l'evoluzione di una sostanza monocomponente in condizione bifasica durante il cambiamento di fase. Il volume di controllo di riferimento è mostrato in Fig.2.1.

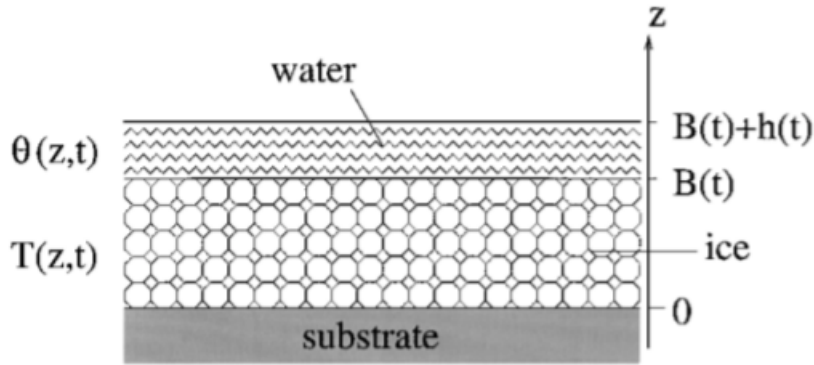


Figura 2.1: Dominio di riferimento per un problema di accrescimento di ghiaccio monodimensionale [13]

Si adopera come coordinata di riferimento la direzione normale alla superficie locale considerata. Le incognite del problema sono gli spessori, B e h , rispettivamente lo spessore dello strato ghiacciato e di quello liquido, nonché le loro temperature T e θ .

Il problema di Stefan è composto dalle seguenti equazioni:

$$\begin{cases} \dot{m}_{fr} + \dot{m}_h = \dot{m}_d + \dot{m}_{in} - \dot{m}_{out} \\ \frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\lambda_u}{\rho_u C_{Pu}} \frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2} \\ \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\lambda_i}{\rho_i C_{Pi}} \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \\ \dot{Q}_{change} = \dot{Q}_{up} + \dot{Q}_{down} \end{cases} \quad (2.1)$$

dove:

- La prima è l'equazione di conservazione della massa. Il significato dei vari termini presenti in tale equazione è il seguente:
 - \dot{m}_{fr} rappresenta il flusso di massa d'acqua che si sta ghiacciando;
 - \dot{m}_h rappresenta il flusso netto di massa entrante nel volume di controllo;
 - \dot{m}_d rappresenta il flusso di massa dovuto alle particelle impattanti;
 - \dot{m}_{in} rappresenta il flusso di massa d'acqua entrante dalle celle circostanti;
 - \dot{m}_{out} rappresenta il flusso di massa uscente verso le celle circostanti;
- La seconda equazione rappresenta l'equazione di diffusione monodimensionale della temperatura all'interno dello strato di liquido
- La terza equazione rappresenta l'equazione di diffusione della temperatura all'interno del film solido
- L'ultima equazione rappresenta il bilancio dei flussi di calore attraverso l'interfaccia (tale equazione viene anche denominata condizione di Stefan)
 - \dot{Q}_{change} rappresenta il calore latente necessario per il passaggio di fase;
 - \dot{Q}_{up} rappresenta il flusso netto di calore proveniente dalla faccia superiore;
 - \dot{Q}_{down} rappresenta il flusso netto di calore proveniente dalla faccia inferiore;

Naturalmente per poter essere risolto il sistema di equazioni differenziali necessita delle opportune condizioni al contorno. In realtà, in questa formulazione, tale problema non ha soluzione in forma chiusa ma può essere risolto solamente con l'aggiunta di ipotesi semplificative che permettono di passare da un sistema di PDEs a un sistema di ODEs introducendo naturalmente delle approssimazioni ai risultati ottenibili.

2.1.2. Modello di Messinger

A partire dal problema di Stefan sono stati sviluppati numerosi modelli. Il primo modello sviluppato appositamente per il campo aeronautico è stato il modello di Messinger [5], sviluppato nel 1953, ed utilizzato abbondantemente da numerosi istituti di ricerca in tutto il mondo (NASA, DRA, ONERA).

I risultati che si ottengono con tale metodo sono in buon accordo con i dati sperimentali

in condizioni di rime ice mentre risultano meno accurati nel caso di glaze ice; in queste condizioni pertanto è stato sviluppato nel 2009, ad opera di Ozgen e Canibek, una versione modificata di tale modello, denominata *Extended Messenger Model*.

In questo paragrafo verrà esposto il modello di Messenger originale del 1953.

Tale modello è basato sulla scrittura di un bilancio di massa e d'energia per il volume di controllo considerato per il quale si vuole andare a simulare l'accrescimento di ghiaccio.

Nel modello si definisce, innanzitutto, la freezing fraction, che rappresenta la frazione di acqua entrante nel volume di controllo che va incontro a ghiacciamento; l'ipotesi fatta da Messenger è che tale quantità d'acqua sia solamente quella impattante sul corpo. La definizione matematica è la seguente:

$$F = \frac{\dot{m}_{ice}}{\dot{m}_{imp}} \quad (2.2)$$

Tanto maggiore risulta la freezing fraction, ovvero tanto più vicino è all'unità, e tanto maggiore sarà il ghiaccio che si andrà a formare nel volume di controllo considerato; mentre valori di F che tendono a zero implicano che il fluido entrante nel volume di controllo tenderà ad uscire e passare al volume adiacente senza ghiacciarsi.

Il modello di Messenger si basa sul bilancio termico su di una superficie non riscaldata. Messenger distingue tre possibilità a seconda del valore di freezing fraction:

- $T_{wall} < 273.15K$: tutte le particelle impattanti congelano perciò $F = 1$. L'equazione di governo sarà:

$$\dot{Q}_c + \dot{Q}_s + \dot{Q}_d = \dot{Q}_l + \dot{Q}_a + \dot{Q}_k \quad (2.3)$$

- $T_{wall} = 273.15K$: alcune particelle impattanti congelano mentre altre rimangono liquide: $0 < F < 1$. L'equazione di governo sarà:

$$\dot{Q}_c + \dot{Q}_e + \dot{Q}_d = \dot{Q}_l + \dot{Q}_a + \dot{Q}_k \quad (2.4)$$

- $T_{wall} > 273.15K$: tutte le particelle impattanti rimangono liquide perciò $F = 0$. L'equazione di governo sarà:

$$\dot{Q}_c + \dot{Q}_e + \dot{Q}_d = \dot{Q}_a + \dot{Q}_k \quad (2.5)$$

Dove:

- \dot{Q}_c rappresenta il flusso di calore trasferito per convezione tra aria e ghiaccio o tra aria e acqua;

- \dot{Q}_a rappresenta il flusso di calore dovuto all'attrito tra aria e superficie (riscaldamento aerodinamico);
- \dot{Q}_l rappresenta il calore latente per il passaggio di stato
- \dot{Q}_e e \dot{Q}_s rappresentano rispettivamente i flussi di calore scambiati durante l'evaporazione dell'acqua e la sublimazione del ghiaccio;
- \dot{Q}_d rappresenta il calore latente delle particelle impattanti;
- \dot{Q}_k rappresenta la potenza termica dovuta all'energia cinetica delle particelle impattanti.

Ci sono delle pesanti ipotesi nel modello che consentono la risoluzione del problema di Stefan, ma introducono, come espresso precedentemente, delle limitazioni sull'accuratezza dei risultati soprattutto nel caso del glaze ice.

Una prima ipotesi forte risiede nel fatto che Messinger ritiene che nelle due fasi presenti nel sistema, la temperatura rimanga costante pari al valore di equilibrio con l'ambiente. Questa ipotesi va a trascurare nell'equazione riportata precedentemente del bilancio energetico, il flusso di calore dovuto alla conducibilità del ghiaccio.

Inoltre, nel modello, la freezing fraction passa dal valore unitario al valore effettivo che assumerà nel problema in esame istantaneamente.

Per ultimo il modello è monodimensionale e quindi non considera il flusso di massa parallelamente alla superficie.

Tutte queste ipotesi fanno sì che la previsione sulla quantità di ghiaccio che si andrà a formare sul corpo risulta sempre per difetto; anche nel caso di rime ice, per il quale, comunque, come detto, le previsioni che si ottengono con il modello di Messinger si dimostrano piuttosto accurate se confrontate con dati sperimentali.

2.1.3. Modello di Myers

Negli anni '90, riprendendo il problema di Stefan e il modello di Messinger descritti nei paragrafi precedenti, Myers [13] propose un nuovo modello di accrescimento di ghiaccio con lo scopo di ottenere previsioni più accurate soprattutto nel caso di glaze ice per il quale il modello di Messinger fornisce, come descritto, risultati poco accurati.

I principali problemi presenti nel modello di Messinger risiedono in alcune ipotesi semplificative adottate nel modello per la risoluzione del problema di Stefan. In particolare nel modello la temperatura viene imposta costante pari al valore di equilibrio, pertanto il modello non riesce a catturare il transitorio durante l'accrescimento di ghiaccio.

inoltre i due strati di acqua e ghiaccio vengono supposti isotermi, perciò nel modello non

viene tenuto conto dello scambio di calore reciproco tra i due strati. Inoltre il modello non permette flussi di calore al di fuori dell'interfaccia ghiaccio-acqua e lo scambio energetico in questa zona può essere bilanciato solamente dal calore latente per la formazione di ghiaccio.

Per queste ipotesi semplificative, il modello di Messinger predice una quantità di ghiaccio inferiore, in alcuni casi anche notevolmente inferiore, a quella che effettivamente si svilupperà nella realtà.

Il modello proposto da Meyers cerca di affrontare il problema di Stefan in maniera differente per cercare di ottenere soluzioni più accurate.

Nel modello di Myers, comunque, per poter risolvere il problema di PDE che definiscono il problema di Stefan, Eq. (2.1), vengono introdotte una serie di ipotesi semplificative.

Le ipotesi sono le seguenti[13]:

- Le sostanze presenti nel sistema, acqua e ghiaccio, hanno proprietà costanti al variare della temperatura. Il ghiaccio può assumere due differenti valori di densità, ρ_r e ρ_g a seconda che si tratti di rime o glaze ice. Viene inoltre assunto cambio istantaneo da un valore all'altro;
- La temperatura del corpo su cui si ha formazione di il ghiaccio è costante e nota;
- La temperatura delle gocce d'acqua è pari a quella dell'aria ($T_d = T_\infty$);
- Il passaggio di fase avviene a una singola temperatura T_f ;
- Lo spessore di liquido è ritenuto costante.

Queste condizioni vengono tradotte in opportune condizioni al contorno. Il problema di Stefan risulterà essere:

$$\begin{cases} \frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\lambda_u}{\rho_u C_{Pu}} \frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2} \\ \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\lambda_i}{\rho_i C_{Pi}} \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \\ \rho_i \frac{\partial B}{\partial t} + \rho_u \frac{\partial h}{\partial t} = \beta L W C V_\infty \\ \rho_i L_f \frac{\partial B}{\partial t} = -\lambda_u \frac{\partial \theta}{\partial t} \Big|_B + \lambda_i \frac{\partial T}{\partial t} \Big|_B \end{cases} \quad (2.6)$$

Legge di accrescimento

La discriminante utilizzata da Meyers per definire la tipologia di ghiaccio è definita da un parametro denominato spessore limite B_g . Se la condizione è tale che B sia minore di B_g allora si è in presenza di *rime ice*; se invece B è maggiore di B_g sarà presente *glaze ice*.

Rime ice

Quando le condizioni sono tali da avere formazione di rime ice, vedasi Sez. 1.2.1, le gocce d'acqua ghiacciano quasi istantaneamente impattando sul corpo. Il sistema Eq. 2.6 può essere semplificato imponendo h e \dot{h} nulle, in quanto è possibile supporre nullo lo strato d'acqua. Tale ipotesi porta a una risoluzione immediata dell'equazione di conservazione della massa Eq. 2.6(c). E' possibile ricavare lo spessore di ghiaccio $B(t)$ mediante la seguente espressione:

$$B(t) = \frac{\beta L W C V_\infty}{\rho_i} t \quad (2.7)$$

Quello che si può notare dall'Eq. 2.7 è un andamento lineare dello spessore di ghiaccio nel tempo ed un rateo di accrescimento costante.

Inoltre si può ricavare che la temperatura parte dal valore pari alla temperatura sulla superficie del corpo e varia linearmente lungo lo spessore di ghiaccio.

Glaze ice

Come descritto nella Sez. 1.2.2, in queste condizioni le gocce d'acqua impattanti sul profilo non ghiacciano istantaneamente ma si muovono lungo il profilo stesso. Pertanto sul profilo di ghiaccio è presente un sottile strato d'acqua.

Andando ad imporre le opportune condizioni al contorno allo strato di ghiaccio e a quello di liquido è possibile ottenere il profilo di temperatura nei due strati:

$$T(z) = T_{wall} + \frac{T_{freezing} - T_{wall}}{B} z \quad (2.8)$$

$$\theta(z) = T_{freezing} + \frac{\dot{Q}_a + \dot{Q}_k - \dot{Q}_c - \dot{Q}_d - \dot{Q}_e}{A(\lambda_u + \frac{h}{A(T_{wall} - T_\infty)(\dot{Q}_c + \dot{Q}_d + \dot{Q}_e)})} z \quad (2.9)$$

Da queste soluzioni, si può ricavare lo spessore di ghiaccio risolvendo opportunamente la condizione di Stefan.

2.1.4. Modello di Meyers modificato

Con un procedimento simile a quello utilizzato da Myers è stato sviluppato, nel lavoro di tesi di Garabelli e Gori [8], un nuovo modello con l'obiettivo di superare alcune limitazioni presenti nel modello di Myers.

In particolare il principale difetto del modello di Myers risiede nel fatto che viene considerato lo strato di film liquido, in particolare il suo spessore, solamente nel calcolo della variazione temporale di B ($\frac{\partial B}{\partial t}$) e non nel calcolo dello spessore limite.

Nel nuovo modello sviluppato, denominato modello di Myers modificato, rispetto al modello di base, si hanno le seguenti introduzioni:

- Innanzitutto il modello di Myers prevede come unica possibilità quella di avere due celle dello stesso tipo adiacenti (glaze-glaze o rime-rime) non contemplando la possibilità che una cella di tipo rime sia adiacente a una cella di tipo glaze e tra le due ci sia uno scambio di massa.

Per introdurre ciò viene modificata l'equazione di conservazione della massa.

In particolare viene introdotto un termine aggiuntivo nell'Eq. 2.7 per considerare la massa di liquido proveniente da una cella di tipo glaze mentre nel caso glaze non viene aggiunto alcun termine per via del fatto che nel caso rime, le gocce impattando ghiacciano immediatamente.

- Viene introdotto un termine di flusso di massa dovuto alla sublimazione
- Viene modificato il problema di diffusione del calore all'interno del ghiaccio nel caso di glaze ice

Questo porta, innanzitutto, ad avere, per quanto riguarda lo spessore nel caso di rime ice, il seguente risultato:

$$B = \frac{\beta L W C V_{\infty} A + \dot{m}_{in} - \dot{Q}_s L_s^{-1}}{A \rho_i} t \quad (2.10)$$

Inoltre viene modificato anche il profilo di temperatura all'interno dello spessore di ghiaccio. Come visto precedentemente, Eq. 2.8, nel modello di Myers la variazione di temperatura viene ritenuta lineare nello spessore. Nel modello modificato, invece, per meglio considerare l'elevata conducibilità termica della superficie che è ritenuta a temperatura costante, si adotta un andamento non lineare della temperatura espresso dalla seguente equazione:

$$T(z) = T_{wall} + \frac{T_{freezing} - T_{wall}}{\sqrt{B}} \sqrt{z} \quad (2.11)$$

2.2. PoliMIce

PoliMIce è un codice modulare che consente di effettuare simulazioni numeriche di accrescimento di ghiaccio intorno a corpi sia bidimensionali che tridimensionali sviluppato, in linguaggio C++, presso il dipartimento di scienze e tecnologie aerospaziali del Politecnico di Milano[8] [9].

Tale codice implementa svariati modelli per studiare il fenomeno dell'accrescimento di ghiaccio tra cui il modello illustrato nel Par. 2.1.4 ovvero una riformulazione del modello di Myers che permette di migliorare la descrizione del fenomeno soprattutto nel caso in cui celle di tipo rime sono affiancate da celle di tipo glaze.

La risoluzione di un problema di accrescimento è un problema complesso, con molteplici parametri in gioco. PoliMIce consente di interfacciarsi con numerosi software, con possibilità di scelta del software più idoneo da parte dell'utente, per poter ricavare tali parametri ed effettuare l'effettivo calcolo di accrescimento di ghiaccio.

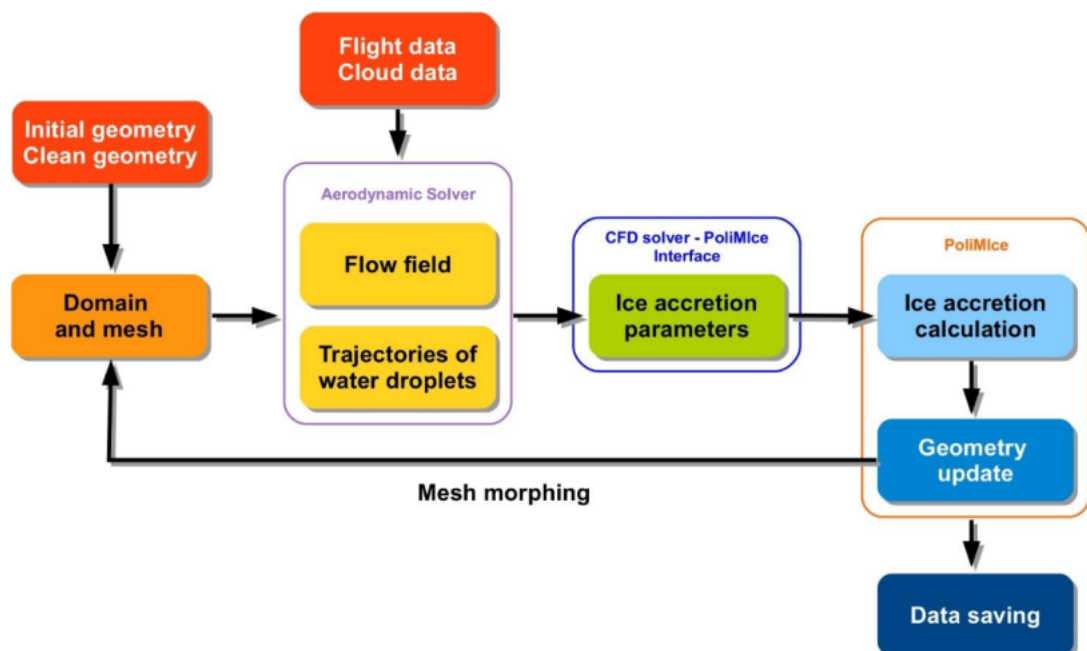


Figura 2.2: Schema logico per effettuare simulazioni di accrescimento ghiaccio mediante Polimice [22]

Il problema di accrescimento viene suddiviso nei seguenti passaggi (Fig. 2.2):

- Definizione del dominio di calcolo e generazione della mesh computazionale;
- Risoluzione del campo aerodinamico;
- Calcolo della traiettoria delle particelle e relativo punto di impatto sul corpo;
- Calcolo dei parametri necessari alla simulazione di accrescimento;
- Formazione e accrescimento di ghiaccio con relativa modifica della geometria del corpo;
- Modifica della mesh
- Ripetizione della procedura finché non viene raggiunto il tempo di esposizione impostato

2.2.1. Cfd

Il primo passo per la risoluzione di un problema di accrescimento di ghiaccio risiede nella determinazione del campo aerodinamico che si sviluppa intorno al corpo in esame che porta alla conoscenza del campo di velocità necessario per poter calcolare la traiettoria delle particelle e delle grandezze termodinamiche necessarie alla successiva simulazione di accrescimento (es. temperatura a parete).

Tale passaggio viene effettuato mediante un opportuno solutore fluidodinamico. Essendo PoliMIce un codice modulare, permette l'effettuazione dei vari passaggi riportati in Fig.2.2 con un qualsiasi software definito dall'utente purché i dati vengano forniti correttamente da un solutore all'altro.

In questa tesi per effettuare tali simulazioni computazionali per determinare la corrente è stato utilizzato il software *open-source* SU2[15].

Innanzitutto, come per un qualunque altro software di simulazione, è necessario fornire la geometria del problema in esame opportunamente meshata, ottenuta mediante software dedicati.

Successivamente vengono definite le opportune condizioni al contorno, il tipo di equazioni che si vogliono risolvere, i metodi numerici da utilizzare per risolverle ed altri parametri necessari alla simulazione. Da questi il software permette di risolvere la corrente in esame ed in particolare ottenere il campo di velocità e i diversi campi termodinamici.

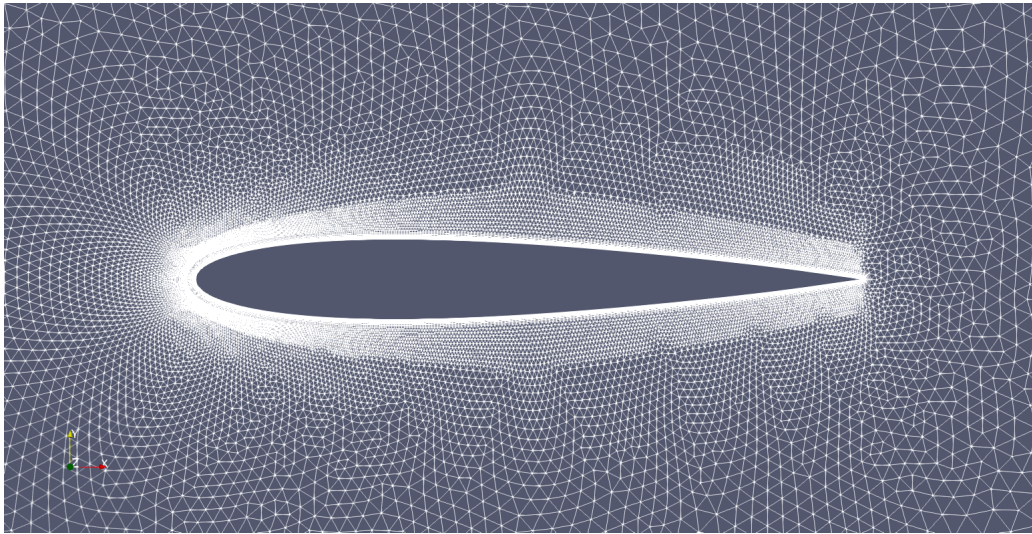


Figura 2.3: Esempio di mesh computazionale per calcolo fluidodinamico

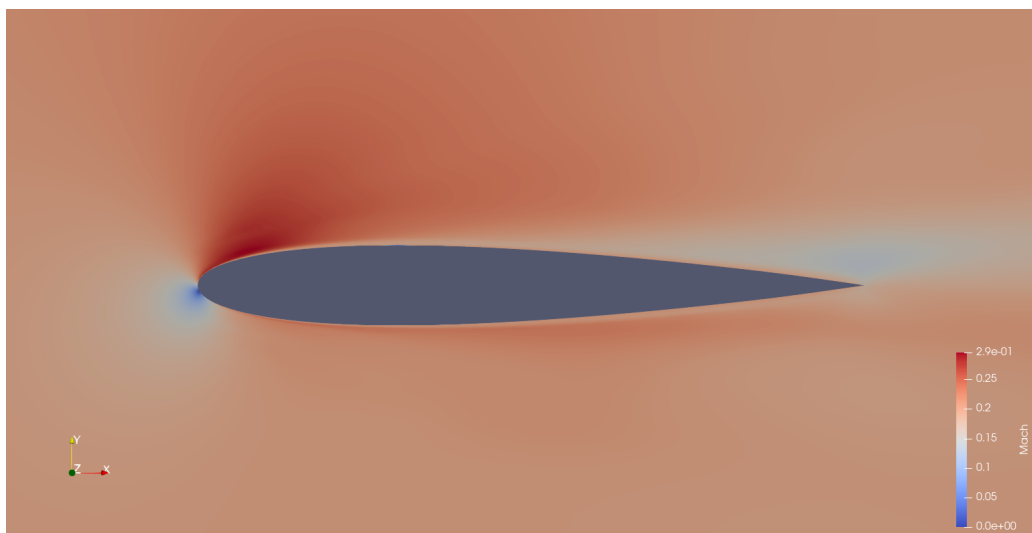


Figura 2.4: Esempio di risoluzione del campo di moto

2.2.2. Particle Tracking

Il passo successivo consiste nel calcolo della traiettoria delle particelle liquide. Il software utilizzato per tale scopo è PoliDrop.

PoliDrop consiste in un solutore lagrangiano, sviluppato all'interno del dipartimento di tecnologie aerospaziali del politecnico di Milano, che a partire dalla conoscenza del campo di velocità, dalle loro dimensione (MVD, vedasi Par.1.3.4), ma permette di calcolare la traiettoria delle particelle e il loro punto di impatto sul corpo.

Il risultato della simulazione mediante PoliDrop fornisce un parametro fondamentale per la successiva simulazione di formazione e accrescimento di ghiaccio ovvero la collection

efficiency β sul corpo (descritta nel Par.1.3.1).

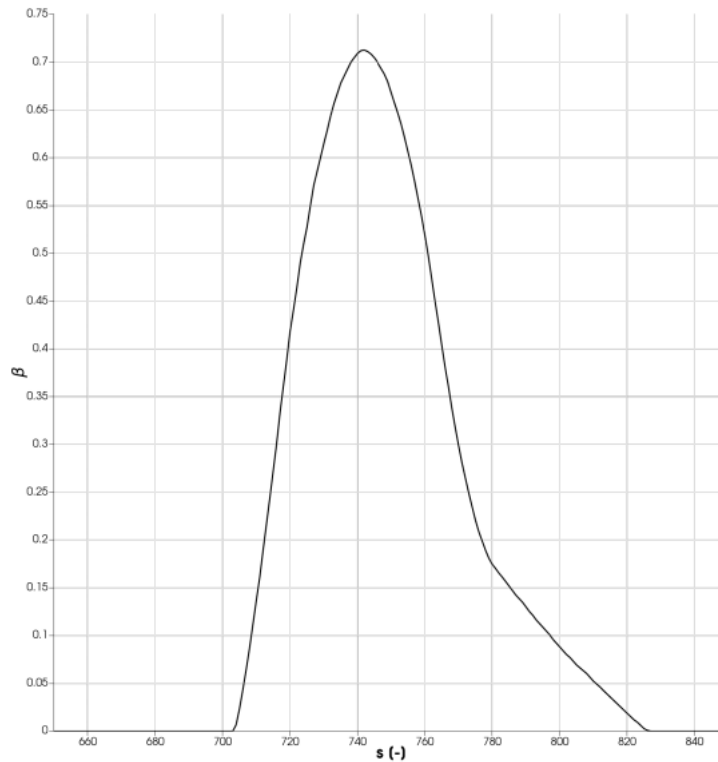


Figura 2.5: Esempio di andamento della *collection efficiency* su di un profilo [22]

2.2.3. Icing

Per poter effettuare calcoli di accrescimento di ghiaccio su un corpo mediante PoliMIce, i risultati ottenuti nei due step precedenti devono essere riscritti in una forma opportuna leggibile da PoliMIce. Tale passaggio viene ottenuto mediante un modulo d'interfaccia tra la simulazione CFD+particle tracking e il modulo di accrescimento di ghiaccio.

In particolare i dati di partenza necessari sono:

- La mesh
- Il campo aerodinamico
- I dati aerodinamici
- La collection efficiency

Questi dati vengono utilizzati per calcolare l'input della simulazione di accrescimento di ghiaccio ovvero la mesh superficiale (ricavata a partire dalla mesh di volume) e una serie di parametri necessari alla simulazione di accrescimento.

Tali parametri includono la distribuzione d'acqua sulla superficie del corpo, lo shear stress sulla parete, il coefficiente di scambio termico, il fattore di recupero ed altri.

A partire da questi parametri, PoliMIce permette, tra le altre cose, la risoluzione del problema di Stefan (Par. 2.1.1) semplificato mediante il modello di Myers modificato descritto nel Par. 2.1.4.

Viene inoltre assunto che il ghiaccio si formi in direzione perpendicolare alla superficie locale considerata.

Il risultato della risoluzione locale delle equazioni che governano il problema sono valori costanti a tratti (su ogni cella) della velocità di accrescimento di ghiaccio.

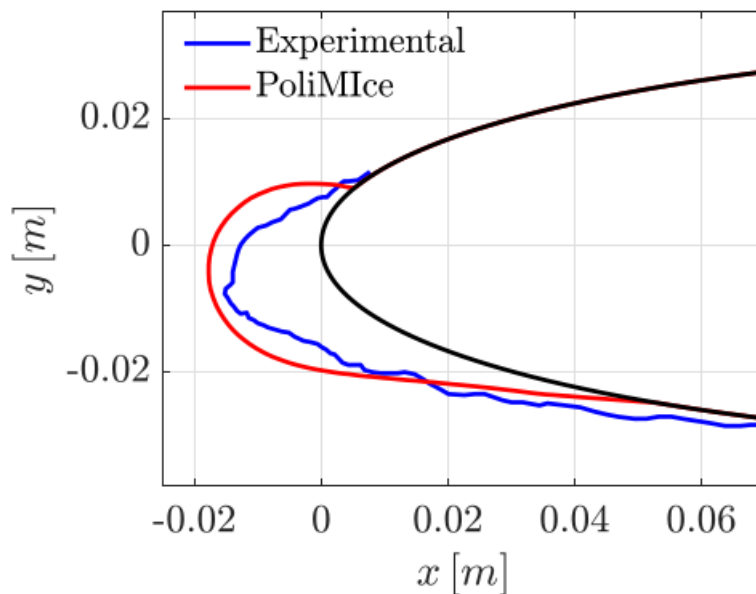


Figura 2.6: Simulazione di ghiaccio mediante PoliMIce e confronto con dati sperimentali

Il problema di formazione di ghiaccio è un problema particolarmente complesso in quanto, mentre si va a formare, il ghiaccio modifica la forma del corpo e pertanto ha un'influenza sul campo aerodinamico e di conseguenza sulla traiettoria delle particelle e sul relativo

punto di impatto.

PoliMIce implementa la possibilità di tener conto di tale fenomeno mediante un procedimento multi-step: periodicamente è possibile andare a modificare la geometria di partenza con l'aggiunta del ghiaccio formatosi ed effettuare nuovamente, dopo aver opportunatamente meshato, la simulazione fluidodinamica e il particle tracking ricavando i parametri necessari alla simulazione di accrescimento.

3 | Morphogenetic model

La ricerca di modelli, che permettano di descrivere in maniera sempre più dettagliata il fenomeno dell'accrescimento di ghiaccio su di un corpo e quindi permettano di effettuare simulazioni sempre più accurate, è in continuo divenire.

In particolare esistono condizioni per le quali le previsioni ottenibili oggi, anche con le attuali potenze di calcolo molto elevate, non risultano particolarmente aderenti ai dati sperimentali.

Questo non è tanto dovuto alle potenze di calcolo disponibili quanto alla complessità del fenomeno dell'accrescimento di ghiaccio in termini di descrizione fisica e modellazione.

Infatti, in tutti i modelli sviluppati ed introdotti nel Cap. 2.2.3, vengono introdotte una serie di ipotesi semplificative, in alcuni casi anche pesanti, sui fenomeni in gioco, quali: impatto, scambi di massa, scambi di calore, solidificazione, ecc., che limitano l'accuratezza dei risultati e il range di applicabilità del modello.

In quest'ottica, ancora tutt'oggi, si è alla continua ricerca di modelli sempre più accurati al fine di ottenere previsioni più aderenti ai dati sperimentali e permettere una progettazione più efficiente degli aeromobili e dei sistemi antighiaccio.

Il modello morfogenetico nasce con l'obiettivo di colmare questa discordanza tra risultati numerici e dati sperimentali; in particolare esistono una serie di condizioni per cui il modello di Myers, anche nelle versioni modificate più recenti e più dettagliate, ha difficoltà nell'ottenere risultati particolarmente accurati.

In particolare i modelli sviluppati riescono ad ottenere previsioni accurate in condizioni in cui il ghiaccio che si va a formare sul corpo ha forma sufficientemente regolare e compatta. Esistono tuttavia, una serie di condizioni, sia in termini di condizione in cui si trovano le particelle (temperatura, dimensione, concentrazione, ecc.) che di geometria del corpo su cui impattano (es. ali a freccia), che portano alla formazione di strutture di ghiaccio particolarmente complesse, caratterizzate da elevata rugosità, presenza di discontinuità quali protuberanze, vuoti e altro che i modelli attuali fanno fatica a catturare in maniera soddisfacente rispetto ai dati sperimentali.

Il modello morfogenetico nasce nell'ottica di sviluppare un approccio differente per ottenere previsioni di accrescimento più accurate.

Tale modello per effettuare simulazioni di accrescimento di ghiaccio, sebbene sia legato principalmente a K.Szilder e E.P.Lozowski, è stato sviluppato a partire dagli anni '80 da diversi autori[17].

I primi esempi di tale modello si possono ritrovare nel lavoro di Lozowski del 1983 con una denominazione di modello “balistico microscopico”. A partire da tale lavoro, altri autori hanno proseguito lo sviluppo di tale modello; tra questi possiamo citare Gates 1988, Personne 1990, Porcu 1995.

Tali modelli, precursori dell'attuale modello morfogenetico, generavano gocce di liquido in posizione casuale e, successivamente, tali gocce venivano “sparate” contro il corpo ghiacciando istantaneamente all'impatto senza permettere nessuna possibilità di movimento a seguito dell'impatto.

Tale implementazione molto limitata, utilizzata per simulare l'accrescimento solamente su cilindri bidimensionali e tridimensionali, è stata successivamente migliorata dallo stesso Lozowski per conferire delle possibilità, seppur limitate, di movimento alle particelle impattanti (in tale modello viene permesso un movimento alle particelle massimo di quattro diametri rispetto al punto di impatto).

Tutti questi lavori sono stati la base che ha portato, nel 1993, Szilder, ha sviluppare un modello innovativo per le simulazioni di accrescimento di ghiaccio che permettesse alle particelle impattanti sul corpo o sulla struttura di ghiaccio già formatasi, di muoversi, anche considerevolmente, rispetto alla propria posizione di impatto ed inoltre tale movimento, viene governato da un certo fattore di casualità.

La prima formulazione di Szilder del 1993 permetteva di effettuare simulazioni solo su corpi bidimensionali.

Successivamente tale modello è stato migliorato, da parte dello stesso Szilder insieme a Lozowski nel '94 e nel '95, implementando la possibilità di effettuare anche simulazioni tridimensionali.

Innanzitutto, il modello, come accennato, permette il movimento delle particelle lungo il corpo e lungo la struttura ghiacciata. Tale movimento delle particelle viene permesso sulla base di dati sperimentali ricavati da Macklin nel 1962 [12].

Macklin, sulla base di dati ricavati da osservazioni su prove in laboratorio di formazione di ghiaccio in galleria a seguito dell'impatto di particelle sottoraffreddate sul corpo in esame, osservò che tale ghiaccio formatosi ha una densità proporzionale al rapporto tra il momento posseduto dalle particelle impattanti, che dipenderà da r^3v , dove r è la dimensione media delle particelle impattanti espressa in μm e v è la loro velocità espressa in ms^{-1} , e la forza tra i legami degli elementi ghiacciati che è proporzionale a r^2 .

Inoltre si è anche riscontrata una dipendenza con la temperatura media della superficie del corpo su cui si forma il ghiaccio T_s .

Mettendo tutti insieme tali parametri si definisce il parametro di Macklin come:

$$R = -\frac{rv}{T_s} \quad (3.1)$$

La calibrazione del modello morfogenetico da parte di Szilder viene fatta legando tale parametro microscopico appena descritto con i parametri macroscopici caratterizzanti la formazione di ghiaccio.

In particolare nel modello originario Szilder si appoggia, per l'impostazione dei parametri in gioco, sulla relazione sperimentale ricavata da Levi nel '91:

$$\rho = 280R^{0.6} \quad (3.2)$$

Tale relazione è valida per valori di R compresi tra 1.5 e $6.5 \mu m m s^{-1} C^{-1}$. Per valori superiori viene presa densità costante pari a $920 kg m^{-3}$.

Il modello morfogenetico, già nella sua versione originaria proposta da Szilder nel 1993, ovvero la sua versione bidimensionale, si basa sull'idea di voler riprodurre e simulare il comportamento naturale delle particelle fluide impattanti sul corpo.

L'obbiettivo di Szilder è quello di creare un modello matematico che permetta di effettuare previsioni di accrescimento di ghiaccio più accurate rispetto a quelle ottenibili con i modelli precedenti, superandone le limitazioni presenti.

In particolare nel modello si vuole andare a mimare il comportamento naturale delle particelle fluide impattanti e ottenere così forme realistiche anche in situazioni particolarmente complesse da un punto di vista computazionale. Tali situazioni comprendono condizioni atmosferiche favorevoli alla formazione di ghiaccio di tipo glaze e condizioni geometriche, come ad esempio l'ala a freccia, che porta alla formazione di strutture complesse, irregolari e discontinue particolarmente complicate da simulare numericamente (es. lobster tail).

L'idea alla base del modello morfogenetico è quella di generare opportunamente, in maniera randomica, delle particelle fluide che, una volta avvenuto l'impatto sul corpo, abbiano possibilità di movimento prima di ghiacciare o di distaccarsi dal corpo.

Innanzitutto va notato che il modello morfogenetico è un modello di accrescimento di ghiaccio pertanto ha bisogno, per poter ottenere delle previsioni, che, in precedenza, vengano risolti, con gli strumenti e codici di calcolo più opportuni, il campo aerodinamico che si sviluppa intorno al corpo e la traiettoria delle particelle per calcolare la collection efficiency (Cap. 1.3.1) ovvero la quantità d'acqua "raccolta" dal corpo. Inoltre riceve in

input un'altra serie di dati per poter effettuare la simulazione di accrescimento che verranno presentati nel proseguo del capitolo.

Nel modello morfogenetico vengono considerati come elementi di fluido non le singole particelle di liquido bensì viene considerata una loro agglomerazione in elementi fluidi di dimensioni maggiore.

La dimensione degli elementi fluidi viene scelta sulla base di un compromesso tra accuratezza dei risultati che si vogliono ottenere mediante la simulazione e costo computazionale. Tali elementi vengono ricavati a partire dalla massa d'acqua impattante sulla superficie, calcolata opportunamente in precedenza e data come input al modello.

Sulla base della definizione degli elementi di fluido, per effettuare la simulazione numerica di accrescimento di ghiaccio, viene generata una griglia computazionale per rappresentare tali elementi e il loro movimento. Tale griglia pertanto risulterà di tipo cartesiana uniforme e sarà caratterizzata da un numero di celle e relative dimensioni che dipenderà dalla dimensione della zona d'interesse e della risoluzione richiesta delle celle cubiche (voxel).

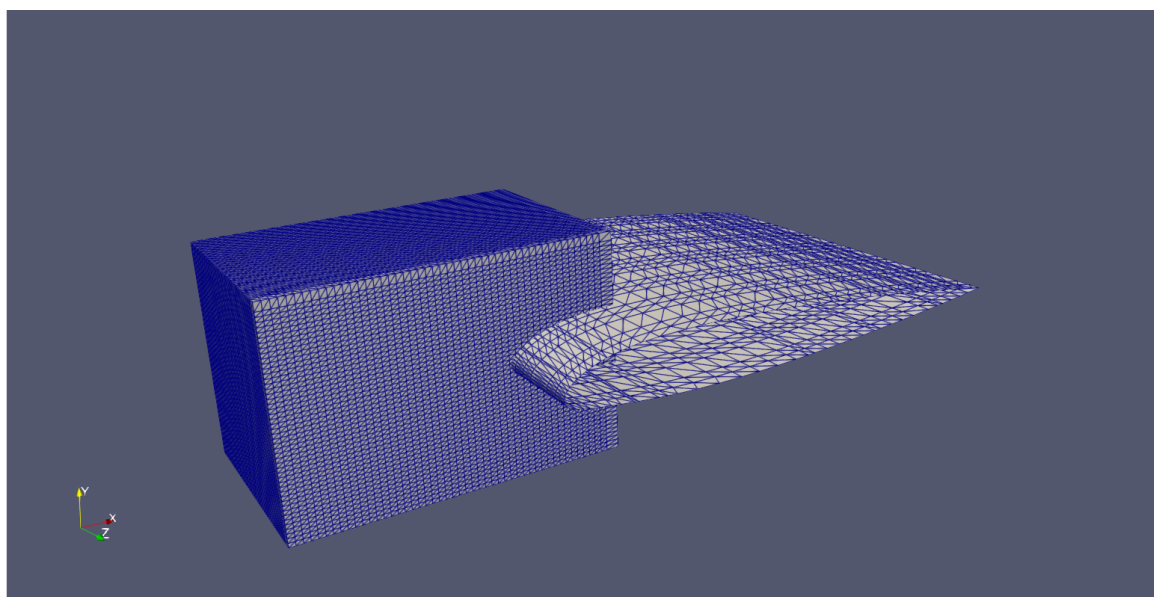


Figura 3.1: Griglia computazionale per la simulazione di accrescimento di ghiaccio con modello morfogenetico

Una volta definiti gli elementi fluidi e il dominio di calcolo computazionale del modello morfogenetico, gli elementi vengono “sparati” in linea retta contro il corpo considerato seguendo la normale alla superficie stessa finché l’elemento fluido incontra la superficie del corpo o una cella in cui è presente un elemento di ghiaccio.

Gli elementi vengono “sparati” in maniera sequenziale ovvero vengono “sparati” uno alla volta pertanto finché un elemento non si sarà congelato o avrà lasciato il corpo ancora allo stato liquido, l’elemento successivo non viene “sparato”. Pertanto il modello tratta un solo elemento fluido alla volta partendo dal suo tracciamento fino al congelamento.

Una volta avvenuto l’impatto dell’elemento sulla struttura solida, qualunque essa sia (corpo o ghiaccio), si entra nella parte del modello il cui obiettivo finale consiste nel calcolare l’eventuale solidificazione degli elementi fluidi o il loro distacco dal corpo.

Agli elementi fluidi, una volta avvenuto l’impatto, viene data possibilità di movimento casuale lungo il corpo o lungo la struttura ghiacciata, a seconda del punto di impatto, di una quantità ipoteticamente illimitata al contrario di quanto avveniva nei modelli precedenti dove non si aveva possibilità di movimento o una possibilità molto limitata (pari a massimo 4 volte il diametro delle gocce [11]).

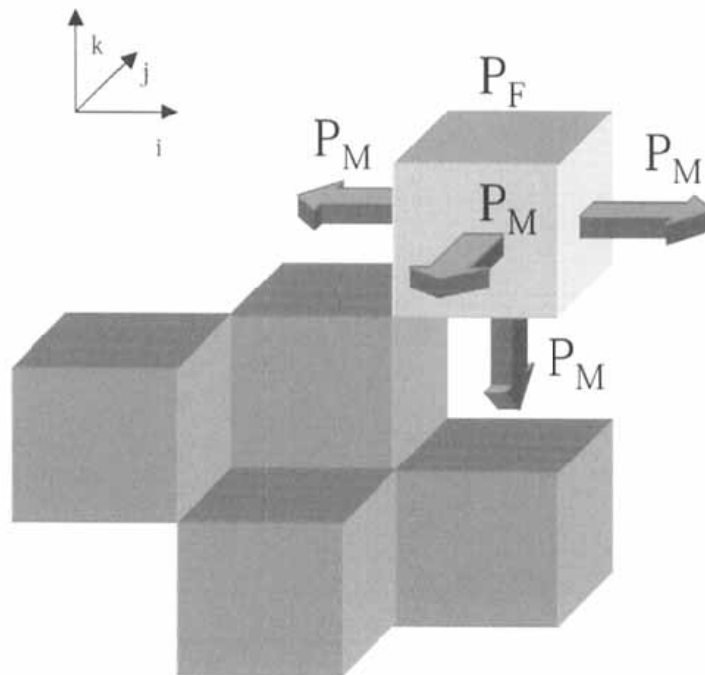


Figura 3.2: Possibilità di movimento degli elementi fluidi a seguito dell’impatto sul corpo o sulla struttura ghiacciata all’interno della griglia computazionale [18]

L'elemento fluido rispetto alla sua iniziale posizione di impatto, può muoversi, mimando quanto può avvenire naturalmente, solamente in celle adiacenti che risultino libere e, pertanto, come si può vedere dalla Fig. 3.2, le sue possibilità di movimento consistono nelle quattro celle adiacenti orizzontalmente oppure nella cella immediatamente a valle.

Tale movimento può avvenire solamente se l'elemento fluido è situato in una cella con almeno un elemento solido adiacente (corpo o ghiaccio); se l'elemento fluido è situato in una cella senza alcuna possibilità di movimento o ha raggiunto una cella in cui non sono presenti elementi solidi nelle sue adiacenze, l'elemento fluido ghiaccerà nella posizione raggiunta.

Per determinare il comportamento dell'elemento fluido ovvero determinare se andrà a muoversi oppure ghiacciarsi, viene generato innanzitutto, ad ogni step, un numero random normalizzato e confrontato con la probabilità di ghiacciamento. Tale probabilità viene calcolata opportunamente in precedenza, mediante PoliMIce, risolvendo il problema di Stefan.

Nel modello morfogenetico originale Szilder assume che la probabilità di movimento orizzontale e la probabilità di movimento a valle siano uguali (denominata probabilità di movimento P_M).

Nel modello si ha la seguente relazione:

$$5P_M + P_F = 100 \quad (3.3)$$

Pertanto, si ha un unico parametro che determina la probabilità di avere movimento ovvero la freezing probability P_F .

Se, a seguito del confronto descritto poc'anzi, l'elemento fluido dispone di possibilità di movimento, tale spostamento avverrà in una delle celle adiacenti a quella di partenza e sarà governato dalla direzione dello sforzo viscoso a parete (parametro anch'esso calcolato da PoliMIce) finché non avverrà il suo ghiacciamento.

Ci sono due parametri che caratterizzano la struttura ghiacciata: la sua densità e la sua dimensione (spessore formatosi).

Nelle celle dove le particelle d'acqua ghiacciano nel modello viene assunto che la densità sia costante pari a 920 kg m^{-3} (valore derivante dagli studi sperimentali di Macklin [12]). Pertanto a valle della simulazione è possibile determinare la densità della struttura ghiacciata andando a considerare il rapporto tra il numero di celle ghiacciate e lo spessore del ghiaccio formatosi (in termini di numero di celle).

Valori bassi di freezing probability implicano che l'elemento fluido, dopo aver impattato, avrà la possibilità di muoversi maggiormente prima di ghiacciarsi e quindi potrà andare ad occupare zone libere all'interno della struttura che risulterà più compatta e pertanto caratterizzata da una maggiore densità. Al contrario elevati valori di freezing probability implicano che l'elemento fluido andrà, in termini statistici, a ghiacciare rapidamente e pertanto il suo movimento sarà molto più limitato creando strutture ghiacciate meno compatte e con presenza di discontinuità all'interno della struttura.

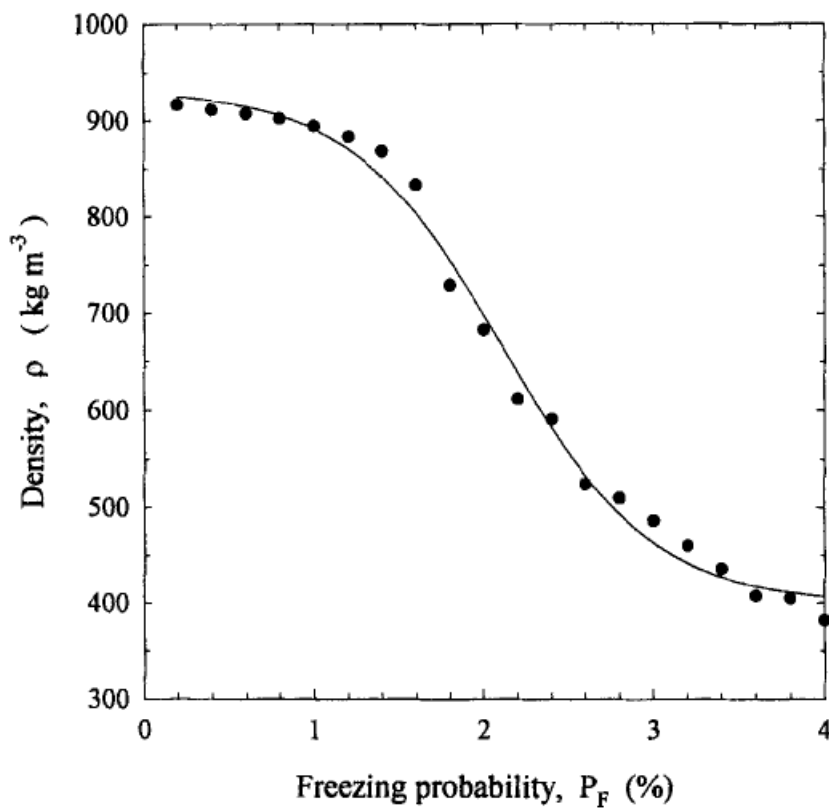


Figura 3.3: Valor medio di densità del ghiaccio formatosi mediante simulazione con modello morfogenetico si Szilder - Lozowki [18]

I risultati di tale modello, in particolare nella versione tridimensionale, dato che il fenomeno di formazione di accrescimento di ghiaccio è intrinsecamente un fenomeno tridimensionale, seppur ancora molto rudimentale, hanno mostrato una decisa maggior coerenza con i dati sperimentali, soprattutto in quelle condizioni in cui i precedenti modelli registravano forti problemi (esempi di tali condizioni includono forti variazioni di concentrazioni di ghiaccio da zone molte dense a zone porose, lobster tail ovvero strutture tridimensionali

molto complesse, fortemente irregolari osservate su ali a freccia).

3.1. Sviluppi ulteriori

Quanto presentato nella sezione precedente del presente capitolo è una descrizione delle caratteristiche peculiari del modello morfogenetico proposto da Szilder nel 1993 (modello bidimensionale) e poi da Szilder e Lozowki nel 1995 [18].

Tale modello riesce, cercando di mimare il comportamento naturale delle particelle, a catturare il comportamento geometrico complesso delle strutture osservate in svariate condizioni in campo aeronautico (e non solo).

Il modello descritto però, come facilmente deducibile, presenta notevoli semplificazioni pertanto i risultati ottenuti, anche se potenzialmente di interesse in termini di complessità delle strutture ottenibili, sono stati migliorati nel corso degli anni cercando di affinare il modello.

In particolare nel modello originale descritto sono presenti notevoli semplificazioni in tutta la prima parte della simulazione.

In particolare la risoluzione del campo aerodinamico e il calcolo della traiettoria delle particelle è stato del tutto omesso e sostituito con una semplice generazione casuale delle particelle a monte del dominio computazionale e successivamente tali particelle vengono “sparate” in linea retta fino al verificarsi dell’impatto con il corpo o con la struttura ghiacciata.

Tale semplificazione aveva lo scopo di agevolare la simulazione in termini di costo computazionale e permettere di focalizzare l’attenzione solamente sulla fase di movimento delle particelle e successivo accrescimento.

Nel corso degli anni tali limitazioni iniziali sono state superate allo scopo di ottenere previsioni sempre più coerenti con i dati sperimentali.

In particolare il problema di accrescimento di ghiaccio viene, in maniera simile a quanto visto nel Cap. 2.2 , scomposto in diversi step, corrispondenti ai principali processi fisici in gioco, visti precedentemente, ognuno dei quali viene trattato con strumenti ad hoc.

Questo permette di creare una struttura modulare che conferisce alla simulazione il grande vantaggio di poter utilizzare lo strumento più idoneo per ogni fase di calcolo, in base alle caratteristiche fisiche del problema in esame.

La simulazione viene divisa nei seguenti step:

- *Risoluzione aerodinamica;*
- *Calcolo della quantità d'acqua impattante (collection efficiency β) e della direzione di impatto delle particelle;*
- *Calcolo della freezing probability;*
- *Ghiacciamento*

Innanzitutto il primo passo consiste nel risolvere il campo aerodinamico. Tale passaggio viene effettuato mediante un opportuno solutore di fluidodinamica computazionale (solutore CFD). Il risultato di questa prima fase porta alla conoscenza del campo aerodinamico, in particolare vengono ottenuti il campo di velocità e le caratteristiche termodinamiche della corrente.

Per effettuare questo passaggio, nella presente tesi, è stato utilizzato il software open source SU2 [15];

Il passo successivo consiste nel calcolo della collection efficiency β (vedasi Cap. 1.3.1) ovvero della massa d'acqua impattante sul corpo e la direzione di impatto delle particelle. Per tale scopo viene utilizzato, nella presente tesi, un solutore lagrangiano sviluppato internamente al dipartimento di tecnologie aerospaziali del politecnico di Milano denominato PoliDrop;

Successivamente, mediante PoliMIce, vengono calcolati una serie di parametri, quali freezing probability, sforzo a parete, mesh superficiale, ed altri, necessari al modello morfogenetico per effettuare la simulazione di accrescimento.

Effettuati tali passaggi si passa all'accrescimento mediante l'algoritmo morfogenetico.

Gli elementi fluidi, che andranno incontro a ghiacciamento, vengono fatti impattare seguendo una traiettoria rettilinea nella direzione di impatto delle particelle d'acqua ottenuta mediante PoliDrop.

A seguito dell'impatto delle particelle sul corpo o sulla struttura ghiacciata, ha inizio la fase di possibile movimento casuale delle particelle che terminerà con il successivo ghiacciamento di queste ultime sul corpo o, se ciò non si verifica, il loro distacco dal corpo.

Per determinare il comportamento dell'elemento fluido ovvero l'eventuale ghiacciamento oppure la prosecuzione del movimento, viene generato un numero random normalizzato e, tale numero viene confrontato con la probabilità locale di ghiacciamento calcolata mediante PoliMIce e dato tale valore come input al modello morfogenetico.

Se, a seguito di tale confronto, la particella non si ghiaccia ma ha possibilità di movimento, tale movimento sarà governato dallo sforzo viscoso a parete, e proseguirà fino al ghiacciamento della particella.

L'accrescimento di ghiaccio sul corpo provoca una variazione del campo aerodinamico

tanto maggiore tanto maggiore è la quantità di ghiaccio formatosi e tanto maggiore è la sua complessità strutturale in termini di forma.

Questo porta a una notevole complessità nell'effettuazione di simulazioni di accrescimento di ghiaccio in quanto, per simulare correttamente il fenomeno ed ottenere risultati aderenti al comportamento reale, è necessario andare periodicamente, in linea teorica ad ogni passo temporale della simulazione, ad aggiornare la forma del corpo, modificata dalla presenza del ghiaccio formatosi, ridefinire la mesh computazionale, ricalcolare il campo aerodinamico ed infine la traiettoria delle particelle ovvero ricalcolare ad ogni step i primi due passi appena descritti.

Tale aggiornamento periodico viene omissso nel presente lavoro di tesi, in quanto richiederebbe potenze e ore di calcolo molto elevate ed inoltre l'obbiettivo è quello di mostrare la bontà del modello morfogenetico in termini di complessità di forme ottenibili paragonato ad altri modelli utilizzati nel corso degli anni a parità di condizioni di calcolo.

Pertanto i risultati che si ottengono con tale modello hanno validità apprezzabile nelle prime fasi di accrescimento, quando la quantità di ghiaccio formatasi sul corpo è modesta e di conseguenza il campo aerodinamico non viene influenzato considerevolmente.

4 | Risultati

Il modello morfogenetico, le cui caratteristiche sono state presentate nel capitolo precedente, è stato implementato all'interno di un codice, scritto in C++, che permetta di effettuare simulazioni di formazione e accrescimento di ghiaccio.

Nel presente capitolo verrà esposto il processo di simulazione mediante tale modello e verranno presentati una serie di risultati ottenuti applicando tale codice a casi di cui si ha una solida disponibilità di dati sperimentali per permettere il confronto tra i risultati numerici ottenuti mediante l'algoritmo morfogenetico e tali dati sperimentali.

Tali dati sperimentali sono stati ripresi da casi proposti per la partecipazione al 1st AIAA Ice Prediction Workshop svoltosi nel luglio 2021.

Tale workshop proposto dall'AIAA (American Institute of Aeronautics and Astronautics) aveva come obiettivo, essendo il primo workshop in assoluto, quello di verificare le attuali capacità predittive in ambito di simulazioni di accrescimento di ghiaccio e pertanto sono stati presentati, per la partecipazione, una serie di problemi, sia bidimensionali che tridimensionali, di cui si ha ampia disponibilità di risultati sperimentali.

L'obiettivo del workshop è stato, come detto, quello di verificare le attuali capacità predittive in tale ambito da parte di università, enti di ricerca, ecc. . . . e determinare le aree critiche dove sono necessari ulteriori sviluppi futuri dei codici in ambito di simulazioni di accrescimento di ghiaccio.

Verrà innanzitutto presentato il processo di simulazione mediante l'algoritmo morfogenetico, illustrandone dettagliatamente tutti i passaggi che permettono di ottenere dei risultati numerici in ambito di accrescimento di ghiaccio, affiancando tale descrizione con i risultati ottenuti su uno dei test case richiesti per la partecipazione al workshop citato, e successivamente verranno esposti più rapidamente altri test case su cui sono state svolte simulazioni con algoritmo morfogenetico.

Va sottolineato inoltre che i risultati numerici ottenuti avranno un discostamento da quelli reali in quanto, seguendo lo stesso processo concettuale di Szilder, non viene considera-

to il loop chiuso di interazione ghiaccio-aerodinamica ma l'aerodinamica viene calcolata solamente inizialmente e mai aggiornata, nonostante che la presenza di ghiaccio sul corpo formatosi a seguito dell'impatto e successivo ghiacciamento va a modificare il campo aerodinamico. Viene fatto ciò, oltre che per minor richiesta di potenza di calcolo, anche per confrontare il modello con altri modelli implementati in passato all'interno di codici di simulazioni a parità di condizioni.

In particolare verrà considerato, per presentare dettagliatamente ogni singolo passaggio, il profilo NACA 23012 con corda di 18 pollici posto nelle seguenti condizioni di volo:

- $\alpha = 2$
- $MVD = 30 \mu m$
- $LWC = 0.42 g/m^3$
- $v = 388.769 m/s$
- $Re = 3.8 * 10^6$
- $Ma = 0.35$
- Temperatura totale media = $-17.8 C$
- Temperatura statica media = $-23.0 C$

Come esposto nel capitolo 3, un problema di accrescimento è un problema molto complesso che necessita di una serie di calcoli preliminari prima di poter eseguire l'effettivo calcolo di accrescimento.

Il primo passo per poter effettuare una simulazione di accrescimento consiste nell'andare, partendo dalla geometria su cui si andrà a formare il ghiaccio, a calcolare il campo aerodinamico che si sviluppa intorno al corpo per poter conoscere sia il campo di velocità che le grandezze termodinamiche fondamentali per i passi successivi.

Utilizzando come solutore aerodinamico SU2 [15] è stato risolto questo primo passo.

Da notare che per poter effettuare calcoli in ambito tridimensionali, a causa dell'elevato costo computazionale, è stato utilizzato il cluster del politecnico di Milano denominato Megamind.

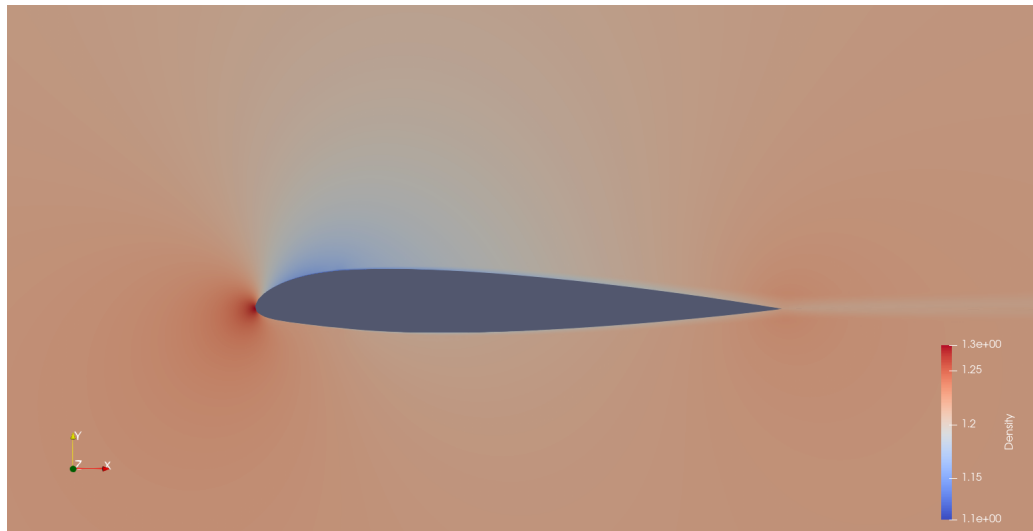


Figura 4.1: Campo aerodinamico sviluppatosi intorno ad ala tridimensionale costituita da profilo NACA 23012 nelle condizioni di volo sopra citate

Una volta noto il campo aerodinamico il passo successivo consiste nel calcolare la quantità d'acqua raccolta dal corpo e la direzione di impatto delle particelle mediante PoliDrop.

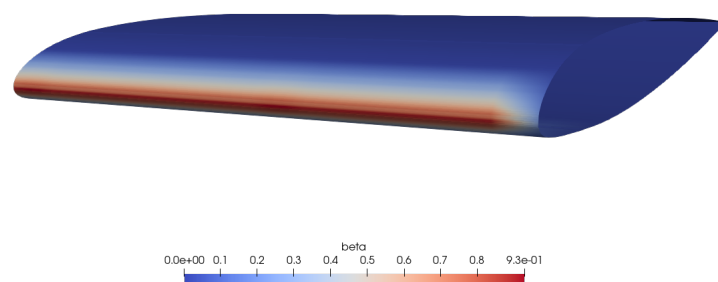


Figura 4.2: Collection efficiency

Prima di entrare nell'effettiva simulazione di accrescimento mediante il modello morfogenetico viene utilizzato PoliMIce per poter ottenere la freezing probability necessaria per determinare l'eventuale ghiacciamento degli elementi fluidi nel successivo modello morfogenetico come esposto nel Cap.3 e altri dati di input necessari al modello.

Tali dati comprendono la griglia superficiale, la massa d'acqua raccolta dal corpo, la direzione di impingement, la skin friction (τ wall).

Il file di configurazione del modello morfogenetico che permette di dare in input tali informazioni al modello ha la seguente struttura:

- Indirizzo della cartella contenente la soluzione di PoliMIce;
- Indirizzo della cartella nella quale si vogliono stampare i risultati del codice morfogenetico;
- Le coordinate di inizio e fine del dominio di calcolo descritta nel Cap. 3, rappresentate dalle variabili BBoxMinX e BBoxMaxX e i corrispettivi nelle altre due direzioni;
- Il numero di punti in cui si vorrà successivamente dividere la box per generare la griglia computazionale di accrescimento al suo interno. La variabile utilizzata è nPointsX;
- Altri parametri utilizzati per settare delle caratteristiche particolari della simulazione

Nel caso in esame sono stati utilizzati i seguenti valori per le variabili appena descritte: per quanto riguarda la dimensione del dominio di calcolo in direzione x, esso si estende da -0.2 a 0.1, in direzione y si estende da -0.2 a 0.1 ed infine in direzione z da 0.1 a 0.3 (4.3).

Il numero di punti utilizzati per dividere il dominio in direzione x è pari a 1500 e pertanto la dimensione della singola cella, o meglio, del singolo elemento fluido è pari a 0.0002.

Da notare la presenza di un'unica variabile per determinare la dimensione delle celle (numero di punti in direzione x). Ciò si verifica in quanto viene generata una griglia con dimensioni delle celle uguali nelle tre dimensioni.

Da ciò risulta che avendo la cella dimensione nelle tre direzioni pari a $2 * 10^{-4}$, il volume del singolo elemento fluido sarà pari a $8 * 10^{-12}$.

Dopodiché viene determinata la traiettoria e il punto di impatto degli elementi fluidi (Cap. 3).

Per effettuare una simulazioni di ghiacciamento mediante l'algoritmo morfogenetico, come descritto in precedenza, è necessario andare a determinare le celle adiacenti, quali di queste sono libere e quali sono ghiacciate e determinare l'eventuale movimento della

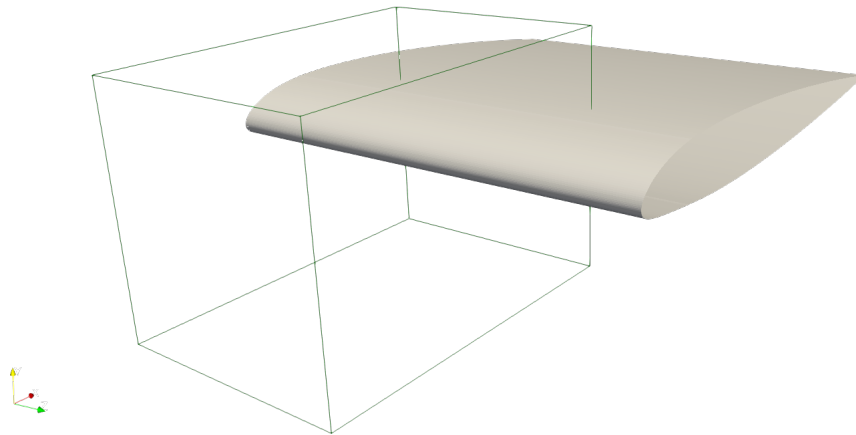


Figura 4.3: Dominio di calcolo generata dal modello morfogenetico

particella.

Uno strumento utilizzato per poter effettuare tali calcoli nella simulazione è una libreria esterna, scritta anch'essa in C++, denominato ANN (approximate nearest neighbor[6]), che implementa strutture ed algoritmi per la ricerca esatta e approssimata del “vicino più prossimo” in un qualunque spazio n-dimensionale.

Nel modello viene implementato un generatore di numeri random normalizzati per poter poi effettuare il confronto con la freezing probability e determinare l'eventuale ghiacciamento o meno degli elementi fluidi.

Il processo va ripetuto per ogni elemento fluido. Va ricordata inoltre la sequenzialità del modello che porta a considerare un solo elemento fluido alla volta.

I risultati ottenuti sul profilo NACA 23012, visualizzati mediante il software open-source paraview, sono i seguenti:



Figura 4.4: Ghiaccio sviluppatosi a seguito della simulazione con modello morfogenetico

A partire dai risultati della simulazione numerica mediante paraview è stato ricavato il profilo di ghiaccio formatosi su di una sezione ottenuta tagliando l'ala tridimensionale con un piano perpendicolare al bordo d'attacco.

Mediante tale operazione è possibile ottenere un datasheet contenente il ghiaccio formatosi e conseguentemente la visualizzazione grafica di tali risultati. Tali risultati infine vengono confrontati con i dati sperimentali disponibili:

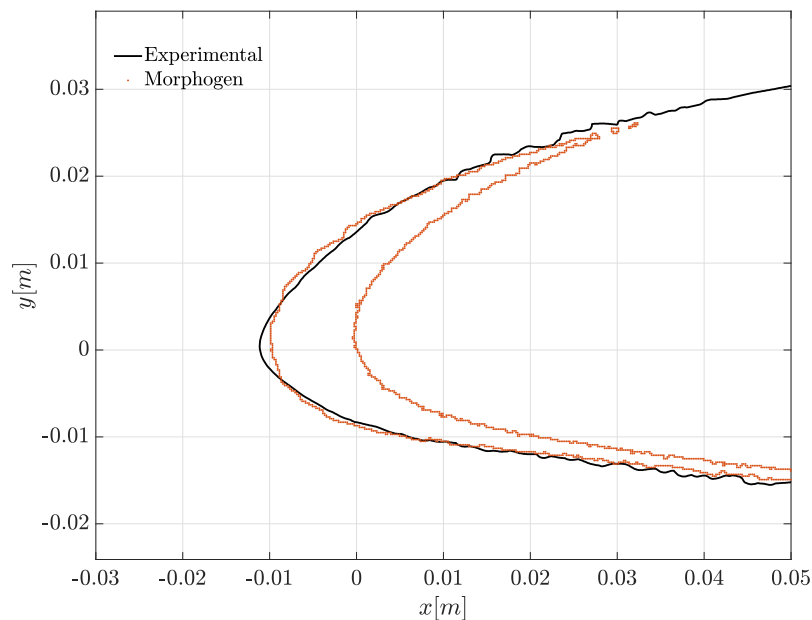


Figura 4.5: Risultati numerici di formazione di ghiaccio estrapolati su di una sezione bidimensionale confrontati con i dati sperimentali disponibili

Il caso in esame del profilo NACA 23012, simulato nelle condizioni riportate precedentemente, presenta un accrescimento di ghiaccio con struttura di tipo rime.

Tale tipologia di ghiaccio, come descritto nel capitolo 1.2.1, è caratterizzata da una elevata regolarità geometrica della struttura ghiacciata e pertanto risulta una maggior facilità di simulazione numerica.

Il modello morfogenetico utilizzato, come i modelli utilizzati fino ad oggi per effettuare previsioni numeriche di accrescimento di ghiaccio, riesce a catturare con notevole precisione il comportamento reale, rappresentato dai dati sperimentali, in tali condizioni.

Il leggero discostamento dei dati numerici da quelli reali è dovuto a delle limitazioni di

implementazione eliminabili in futuro come ad esempio l'implementazione del feedback loop tra aerodinamica e variazione di forma dovuta alla formazione di ghiaccio che imporrebbe un aggiornamento della forma geometrica del corpo, a causa del ghiaccio formatosi, ad ogni time step e conseguentemente una variazione dell'aerodinamica.

Verranno ora riportati, in maniera più rapida seguendo lo stesso flusso logico appena esposto, vari casi simulati con il modello morfogenetico e il conseguente confronto con i dati sperimentali.

NACA 23012

Da notare che tale profilo è identico al caso esposto precedentemente nel capitolo ma cambiando le condizioni viene ottenuto ghiaccio di tipo glaze

- *Condizioni di volo*
 - $\alpha = 2$
 - $MVD = 15 \mu m$
 - $LWC = 0.81 g/m^3$
 - $v = 388.769 m/s$
 - $Re = 3.4 * 10^6$
 - $Ma = 0.31$
 - Temperatura totale media = $-1.9 C$
 - Temperatura statica media = $-7.1 C$
- *Calcoli preliminari*

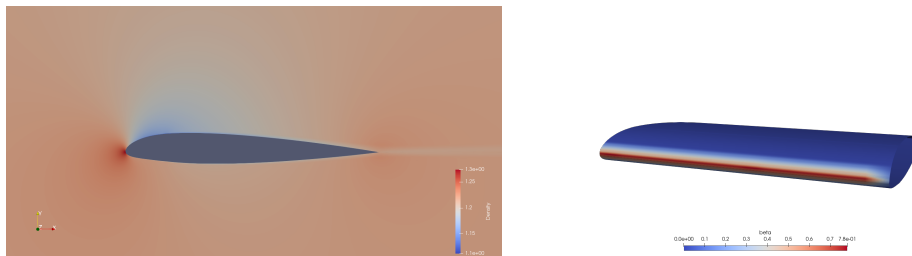


Figura 4.6: Aerodinamica mediante SU2 e collection efficiency mediante PoliDrop

- *Parametri per la simulazione di accrescimento con il modello morfogenetico*

Nel caso in esame sono stati utilizzati i seguenti valori per le variabili appena descritte: per quanto riguarda la dimensione del dominio di calcolo in direzione x, esso si estende da -0.2 a 0.1, in direzione y si estende da -0.1 a 0.1 ed infine in direzione z da 0.1 a 0.3 (4.7).

Il numero di punti utilizzati per dividere il dominio in direzione x è pari a 1500 e pertanto la dimensione della singola cella, o meglio, del singolo elemento fluido è pari a 0.0002.

Da ciò risulta che avendo la cella dimensione nelle tre direzioni pari a $2 * 10^{-4}$, il volume del singolo elemento fluido sarà pari a $8 * 10^{-12}$.

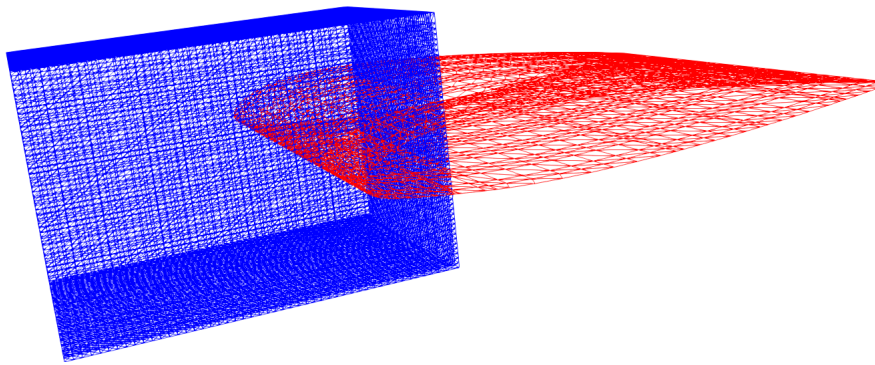


Figura 4.7: Dominio di calcolo del modello morfogenetico

- *Accrescimento di ghiaccio*

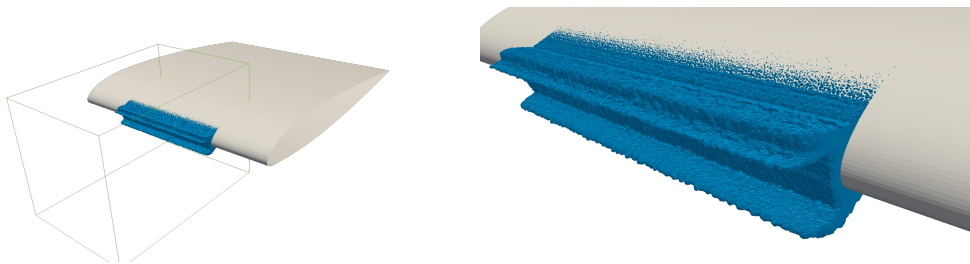


Figura 4.8: Ghiaccio formatosi nella zona di bordo d'attacco previsto con il modello morfogenetico

- *Confronto*

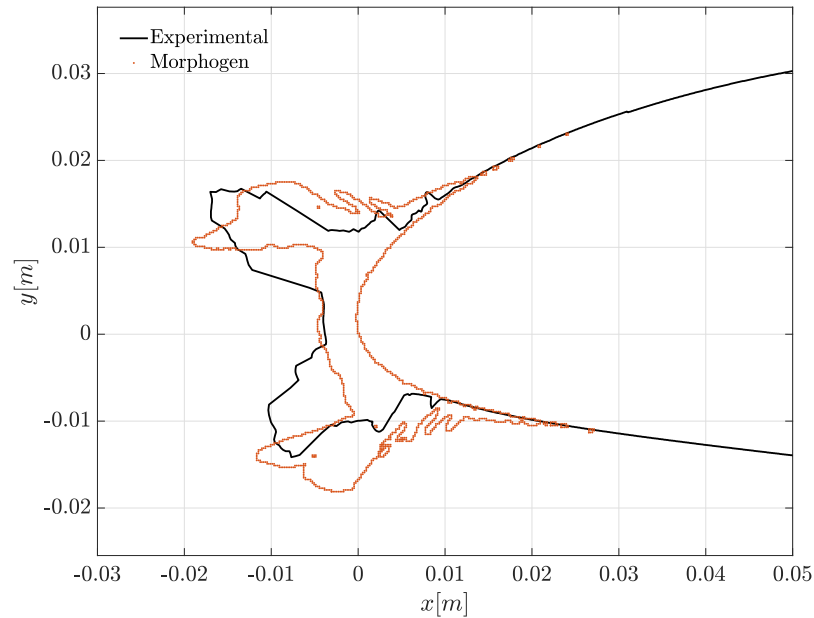


Figura 4.9: Confronto con dati sperimentali

Il caso in esame presenta lo stesso profilo del caso precedente, NACA 23012, ma in condizioni differenti, tali da portare alla formazione di glaze ice.

Tale tipologia di ghiaccio, Cap. 1.2.2 presenta una struttura geometrica notevolmente più complessa, con presenza di discontinuità, irregolarità, vuoti che portano a una notevole difficoltà, tutt'oggi ancora irrisolta, nell'effettuare previsioni accurate e coerenti con i dati sperimentali.

Il modello morfogenetico, Cap. 3, nasce proprio per cercare di colmare questa lacuna. Dal risultato riportato nel grafico si evince che il modello morfogenetico riesce a catturare situazioni particolarmente complesse in termini di geometrie ottenibili con una buona accuratezza nonostante le notevoli possibilità di ulteriori sviluppi del modello.

NACA 23012

Condizione di SLD

- *Condizioni di volo*
 - $\alpha = 2$
 - $MVD = 21.5\mu m$
 - $LWC = 1.64/m^3$
 - $v = 388.769 m/s$
 - $Avg.Totaltemperature = -7.3C$
 - $Temperaturastaticamedia = -12.6C$
- *Calcoli preliminari*

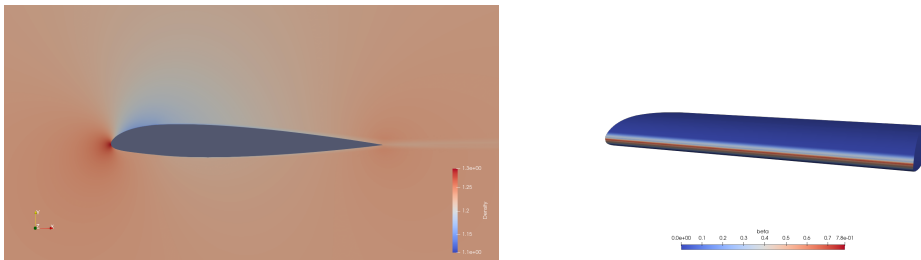


Figura 4.10: Aerodinamica mediante SU2 e collection efficiency mediante PoliDrop

- *Parametri per la simulazione di accrescimento con il modello morfogenetico*

Nel caso in esame sono stati utilizzati i seguenti valori per le variabili appena descritte: per quanto riguarda la dimensione del dominio di calcolo in direzione x, esso si estende da -0.4 a 0.3, in direzione y si estende da -0.3 a 0.3 ed infine in direzione z da 0.4 a 0.9.

Il numero di punti utilizzati per dividere il dominio in direzione x è pari a 1100 e pertanto la dimensione della singola cella, o meglio, del singolo elemento fluido è pari a 0.0002.

Da ciò risulta che avendo la cella dimensione nelle tre direzioni pari a $6.3 * 10^{-4}$, il volume del singolo elemento fluido sarà pari a $2.577 * 10^{-10}$.

- *Accrescimento di ghiaccio*

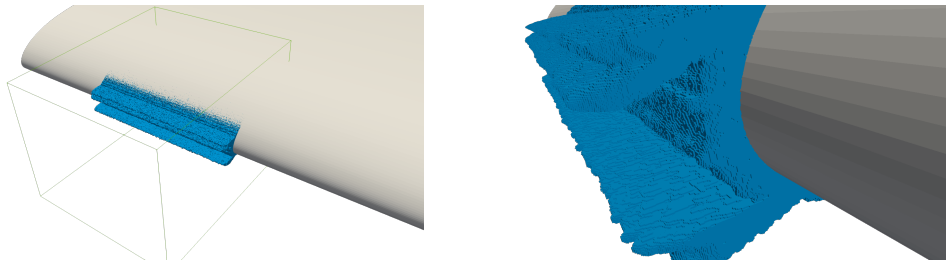


Figura 4.11: Ghiaccio formatosi nella zona di bordo d'attacco previsto con il modello morfogenetico ed estrapolazione dati numerici

- *Confronto*

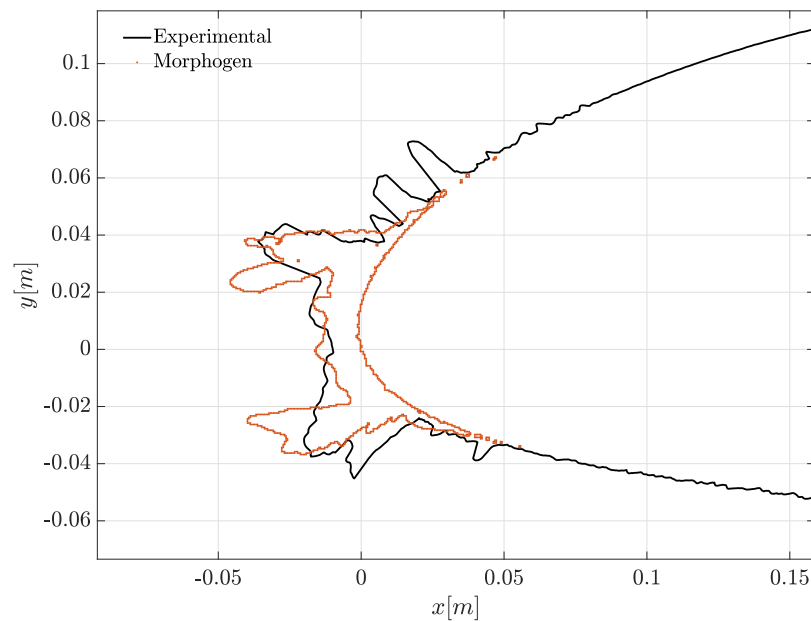


Figura 4.12: Confronto con dati sperimentali

Il caso in esame presenta lo stesso profilo dei due casi precedenti, ovvero NACA 23012, ma in condizioni differenti.

In particolare il profilo è in condizioni tali da essere presenti particelle fluide di tipo SLD ovvero supercooled large droplets.

Tali particelle hanno la caratteristica di avere dimensioni maggiori rispetto alle classiche particelle impattanti e pertanto, a causa della massa maggiore delle singole particelle,

hanno un'interazione più complicata sia con il campo aerodinamico che con il corpo su cui impattano.

Tali caratteristiche si ripercuotono sulla complessità delle strutture di ghiaccio che si andranno a formare sul corpo e di conseguenza sulla complessità nell'effettuare simulazioni numeriche in tali condizioni.

I risultati che si sono ottenuti con il modello morfogenetico, se confrontati con i dati sperimentali (. 4.12), presentano un andamento simile a quello reale nella zona di bordo d'attacco dove vi è la presenza di due protuberanze mentre si discostano maggiormente proseguendo a valle lungo il profilo dove non vengono ben catturate le formazioni di ghiaccio di dimensione inferiore.

NACA 0012

Ala con freccia di 30° in condizioni di glaze ice

- *Condizioni di volo*
 - $\alpha = 0$
 - $MVD = 34.7\mu m$
 - $LWC = 0.50/m^3$
 - $v = 388.769 m/s$
 - $Temperaturastaticamedia = 266C$
- *Calcoli preliminari*

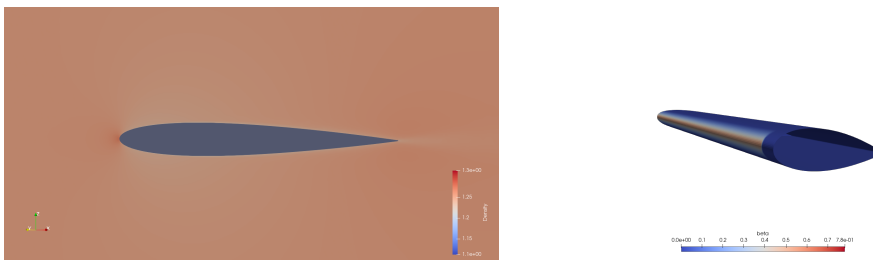


Figura 4.13: Aerodinamica mediante SU2 e collection efficiency mediante PoliDrop

- *Parametri per la simulazione di accrescimento con il modello morfogenetico*
 Nel caso in esame sono stati utilizzati i seguenti valori per le variabili appena descritte: per quanto riguarda la dimensione del dominio di calcolo in direzione x, esso si estende da -0.6 a 0.5, in direzione y si estende da 0.4 a 1.2 ed infine in direzione

z da -0.2 a 0.2.

Il numero di punti utilizzati per dividere il dominio in direzione x è pari a 1600 e pertanto la dimensione della singola cella, o meglio, del singolo elemento fluido è pari a 0.0002.

Da ciò risulta che avendo la cella dimensione nelle tre direzioni pari a $6.8 * 10^{-4}$, il volume del singolo elemento fluido sarà pari a $3.25 * 10^{-10}$.

- *Accrescimento di ghiaccio*

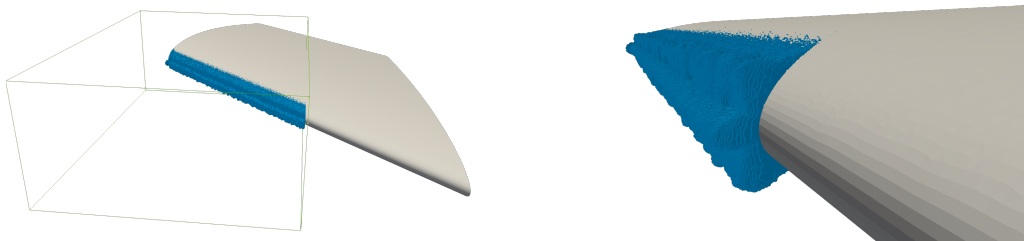


Figura 4.14: Ghiaccio formatosi nella zona di bordo d'attacco previsto con il modello morfogenetico

- *Confronto*

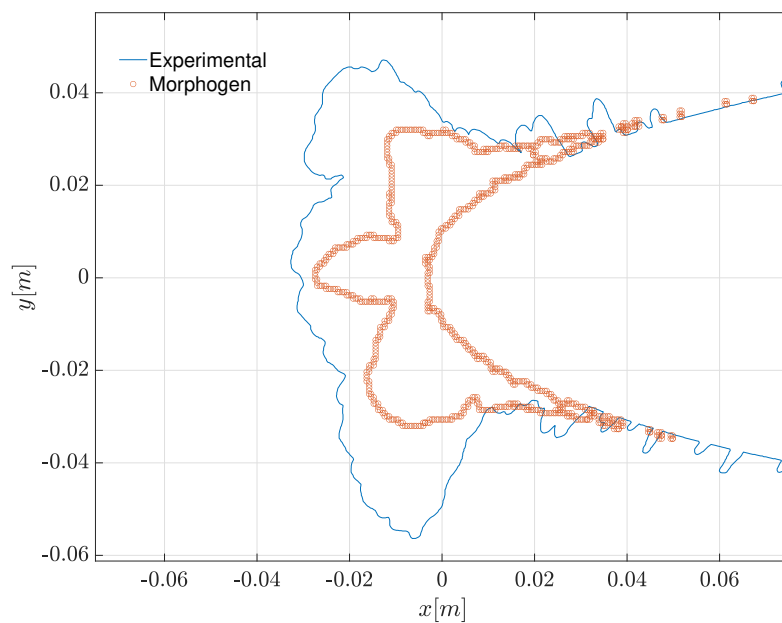


Figura 4.15: Confronto con dati sperimentali

Il caso in esame presenta un'ala con freccia positiva di 30° costituito da un profilo simmetrico NACA 0012 posto nelle condizioni di volo descritte precedentemente.

In questo test case si è voluto testare le potenzialità del modello morfogenetico simulando un'ala a freccia, la quale è una condizione geometrica che porta ad avere strutture di ghiaccio particolarmente complesse, denominate lobster tail, caratterizzate da irregolarità e discontinuità difficili da catturare con i modelli numerici utilizzati fino a oggi.

I risultati ottenuti mediante il modello morfogenetico, sebbene ricalchino leggermente il comportamento reale della struttura di ghiaccio (presenza di una regione centrale con due lobi laterali), si discostano abbondantemente dai dati reali.

Un motivo di questo discostamento è dovuto al fatto che in un'ala a freccia si instaura un campo aerodinamico particolarmente complesso che risentirà fortemente della presenza di ghiaccio.

Nel nostro modello questo accoppiamento tra aerodinamica e ghiaccio calcolato non è presente in quanto l'aerodinamica viene calcolata ad ala pulita e mai riaggiornata successivamente.

5 | Conclusione

Il problema di simulare l'accrescimento di ghiaccio su un corpo è un problema molto complesso da risolvere ma di fondamentale importanza nella progettazione di aeromobili e pertanto la ricerca di modelli che permettano di ottenere risultati sempre più accurati è in continuo divenire.

Il modello morfogenetico, proposto da Szilder, vuole superare i limiti presenti nei modelli fino ad oggi adoperati cercando di mimare il comportamento naturale delle particelle fluide impattanti sul corpo su cui si vuole effettuare la previsione di accrescimento.

Tale approccio, come si può evincere dai grafici esposti nel capitolo precedente, permette di ottenere forme di complessità elevate, con presenza di discontinuità, fori, ecc..., simili a quelle che si sviluppano naturalmente al contrario di quanto avveniva con i modelli precedenti che permettevano di ottenere previsioni attendibili solamente in condizioni di rime ice e con geometrie del corpo semplici (ad esempio non è possibile simulare le strutture complesse che si generano sulle ali a freccia).

I risultati che si sono ottenuti permettono di sostenere le potenzialità del modello morfogenetico nelle previsioni di accrescimento di ghiaccio, nonostante i risultati siano ancora notevolmente migliorabili.

Un esempio risiede in una futura implementazione di un feedback loop tra aerodinamica e formazione di ghiaccio, omessa nella presente tesi, in quanto ad ogni time step il ghiaccio formatosi modifica il campo aerodinamico con tutto quello che ne consegue.

Bibliografia

- [1] URL https://aircrafticing.grc.nasa.gov/1_1_2_5.html.
- [2] URL <https://www.aircraftsystemstech.com/2017/05/wing-and-stabilizer-deicing-systems.html>.
- [3] URL <http://www.navyaviation.tpub.com>.
- [4] *Aircraft Icing Handbook*. Civil Aviation Authority, 2000.
- [5] B.Messinger and L. A. Corporation. equilibrium temperature of an unheated icing surface as a function of air speed. *publisher not identified*, cit. on pp. 2, 15, 16, 1953.
- [6] D.Mount and S.Arya. Ann: A library for approximate nearest neighbor searching. URL <http://www.cs.umd.edu/~mount/ANN>.
- [7] R. Gant, N.P.Dart, and J. Cansdale. Aircraft icing. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 358:2873–2911, 2000.
- [8] M. Garabelli and G.Gori. Polimice: un ambiente di simulazione per la previsione dell'accrescimento di ghiaccio su velivoli, 2013.
- [9] G. Gori, M. Zocca, M. Garabelli, A. Guardone, and G. Quaranta. Polimice: A simulation framework for three-dimensional ice accretion. *Applied Mathematics and Computation*, 267:96–107, 2015.
- [10] E. Linacre and B. Geerts. Cloud liquid water content, drop sizes, and number of droplets, 1999. URL http://www-das.uwyo.edu/~geerts/cwx/notes/chap08/moist_cloud.html.
- [11] E. Lozowski, M. J. Brett, N. Tait, and T. J. Smy. Simulating giant hailstone structure with a ballistic aggregation model. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 117:427–431, 1991.
- [12] W. Macklin. The density and structure of ice formed by accretion. *Q.J.R. Meteorol Soc.*, 88:30–50, 1962.

- [13] T. Myers. Extension to the messinger model for aircraft icing. *AIAA journal*, 39(2): 211–218, 2001.
- [14] J. Stefan. Über die theorie der eisbildung, insbesondere über die eisbildung im polarmeere. *Annalen der Physik*, 278(2):269–286, 1891.
- [15] SU2. The open-source cfd code. URL <https://su2code.github.io/>.
- [16] K. Szilder. Theoretical and experimental study of ice accretion due to freezing rain on an inclined cylinder. *Cold Regions Science and Technology*, 2018.
- [17] K. Szilder and E. P. Lozowski. Three-dimensional numerical simulation of ice accretion using a discrete morphogenetic approach. *9th AIAA Atmospheric and Space Environments Conference*, 2000.
- [18] K. Szilder and E. P. Lozowski. Three-dimensional modelling of ice accretion density. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 2017.
- [19] K. Szilder and E. Lozowski. Numerical simulation of complex ice shapes on swept wings. *ICAS-Secretariat - 25th Congress of the International Council of the Aeronautical Sciences*, 2006.
- [20] K. Szilder and E. Lozowski. Numerical simulation of ice accretion influenced by an anti-icing heating system. *31st Congress of the International Council of the Aeronautical Sciences*, 2018.
- [21] K. Szilder and W. Yuan. *In-flight icing on unmanned aerial vehicle and its aerodynamic penalties*. Civil Aviation Authority, 2017.
- [22] Zocca, Gallia, Bellosta, and Morelli. Polimice user manual. 2021.

Elenco delle figure

1.1	Incidente del volo West Wind Aviation 282 nel Dicembre 2017	1
1.2	<i>Un A-10 Thunderbolt II (a sinistra) e un KC-135 Stratotanker (a destra) durante una prova in volo di accrescimento di ghiaccio. In alto un T-38 Talon fotografa l'esperimento in volo (foto: U.S. National Archives)</i>	2
1.3	<i>Ice accretion: a sinistra viene mostrata una simulazioni numeriche su profilo alare, mentre a destra è presente una prova sperimentale per testare il funzionamento di dispositivi anti-ghiaccio</i>	3
1.4	<i>Rime ice formatosi su di un modello di galleria</i>	5
1.5	<i>Glaze ice formatosi su di un modello di galleria</i>	6
1.6	<i>Collection efficiency: definizione per geometria tridimensionale</i>	7
1.7	<i>Esempio di andamento della collection efficiency</i>	8
1.8	<i>Frequenza relativa e cumulata di ghiacciamento delle particelle in funzione del LWC[10]</i>	9
1.9	<i>Collection efficiency in funzione del MVD [7]</i>	11
1.10	Sistemi antighiaccio [3]	12
1.11	Sistema antighiaccio pneumatico [2]	13
2.1	Dominio di riferimento per un problema di accrescimento di ghiaccio monodimensionale [13]	16
2.2	Schema logico per effettuare simulazioni di accrescimento ghiaccio mediante Polimice [22]	23
2.3	Esempio di mesh computazionale per calcolo fluidodinamico	25
2.4	Esempio di risoluzione del campo di moto	25
2.5	Esempio di andamento della <i>collection efficiency</i> su di un profilo [22] . . .	26
2.6	Simulazione di ghiaccio mediante PoliMIce e confronto con dati sperimentali	27
3.1	Griglia computazionale per la simulazione di accrescimento di ghiaccio con modello morfogenetico	32
3.2	Possibilità di movimento degli elementi fluidi a seguito dell'impatto sul corpo o sulla struttura ghiacciata all'interno della griglia computazionale [18]	33

3.3	Valor medio di densità del ghiaccio formatosi mediante simulazione con modello morfogenetico si Szilder - Lozowki [18]	35
4.1	Campo aerodinamico sviluppatosi intorno ad ala tridimensionale costituita da profilo NACA 23012 nelle condizioni di volo sopra citate	41
4.2	Collection efficiency	41
4.3	Dominio di calcolo generata dal modello morfogenetico	43
4.4	Ghiaccio sviluppatosi a seguito della simulazione con modello morfogenetico	43
4.5	Risultati numerici di formazione di ghiaccio estrapolati su di una sezione bidimensionale confrontati con i dati sperimentali disponibili	44
4.6	Aerodinamica mediante SU2 e collection efficiency mediante PoliDrop . . .	45
4.7	Dominio di calcolo del modello morfogenetico	46
4.8	Ghiaccio formatosi nella zona di bordo d'attacco previsto con il modello morfogenetico	46
4.9	Confronto con dati sperimentali	47
4.10	Aerodinamica mediante SU2 e collection efficiency mediante PoliDrop . . .	48
4.11	Ghiaccio formatosi nella zona di bordo d'attacco previsto con il modello morfogenetico ed estrapolazione dati numerici	49
4.12	Confronto con dati sperimentali	49
4.13	Aerodinamica mediante SU2 e collection efficiency mediante PoliDrop . . .	50
4.14	Ghiaccio formatosi nella zona di bordo d'attacco previsto con il modello morfogenetico	51
4.15	Confronto con dati sperimentali	51

Elenco delle tabelle

1.1	<i>In-flight icing risk in various atmospheric conditions [4]</i>	9
-----	---	---

