

UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI  
GENOVA

SCUOLA POLITECNICA  
DITEN

DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA NAVALE,  
ELETTRICA,  
ELETTRONICA E DELLE TELECOMUNICAZIONI



LAUREA MAGISTRALE IN INGEGNERIA  
NAVALE

ANNO ACCADEMICO 2022/23

**Analisi delle Prestazioni di un Propulsore  
Azimutale in Regime di Flusso Obliquo**

**Relatori:**

Prof. Stefano Gaggero

**Candidato:**

Andrea Fontana



# Indice

<b>Indice .....</b>	<b>3</b>
<b>Introduzione .....</b>	<b>7</b>
1. Analisi sperimentali su <i>model test</i> .....	10
2. Simulazioni numeriche .....	15
3. Equazioni governanti del problema .....	19
3.1 Modello del continuo .....	19
3.2 Principi della meccanica dei fluidi .....	22
3.3 Fluidi Viscosi .....	24
4. Approccio alla CFD .....	28
4.1 Mesh di Calcolo .....	30
5. Scopo della Tesi .....	38
<b>Materiali e Metodi .....</b>	<b>40</b>
1. Studio sperimentale di Heinke .....	40
1.1 Geometria del problema .....	40
1.2 Dispositivi di misurazione .....	42
1.3 Coefficienti misurati .....	46
1.4 Risultati delle prove .....	47
2. Implementazione su STAR-CCM+ .....	49
2.1 Geometria e i sistemi di riferimento .....	49
2.1.1 Geometria .....	49
2.1.2 Sistemi di riferimento .....	52
2.1.3 Dominio di calcolo .....	53
2.1.4 Definizione delle <i>Region</i> e condizioni al contorno .....	54
2.2 Le Mesh di calcolo .....	58
2.2.1 Definizione delle Mesh .....	58

2.2.2 Strato limite .....	60
2.2.3 Mesh grading level e raffinamenti volumetrici .....	62
2.3 Fisica del problema .....	65
2.3.1 Soluzione MRF .....	67
2.3.2 Soluzione Non-Stazionaria .....	68
2.3.3 Calcolo dei coefficienti.....	70
3. Analisi di convergenza.....	71
3.1 Validazione delle mesh e del modello.....	73
3.2 Analisi di convergenza e scelta della mesh .....	74
4. Modello con disco attuatore.....	76
4.1 <i>Virtual disk model</i> .....	76
4.1.1 <i>Body Force Propeller Method</i> .....	76
4.1.2 Implementazione su STAR-CCM+ .....	77
<b>Risultati .....</b>	<b>83</b>
1. Analisi di convergenza.....	85
1.1 Validazione della mesh e del modello.....	85
1.1.1 Coefficienti per $\psi = 0^\circ$ .....	85
1.1.2 Coefficienti per $\psi = 45^\circ$ .....	87
1.1.3 Coefficienti per $\psi = 90^\circ$ .....	89
1.2 Analisi di convergenza e scelta della mesh .....	91
1.2.1 Curve estrapolate per $\psi = 0^\circ$ .....	92
1.2.2 Curve estrapolate per $\psi = 45^\circ$ .....	94
1.2.3 Curve estrapolate per $\psi = 90^\circ$ .....	96
1.3 Valori caratteristici del campo di moto .....	98
1.3.1 $V_x$ e $C_p$ per $\psi = 0^\circ$ .....	98
1.3.1 $V_x$ e $C_p$ $\psi = 45^\circ$ .....	99
1.3.1 $V_x$ e $C_p$ per $\psi = 90^\circ$ .....	100

2. Analisi a $\psi = 0^\circ$ in configurazione <i>Pull</i> e <i>Push</i> .....	101
2.1 Configurazione <i>Pull</i> .....	101
2.2 Configurazione <i>Push</i> .....	103
3. Analisi in configurazione <i>Pull</i> .....	104
3.1 Coefficienti adimensionali .....	105
3.1.1 Simulazioni per $J = 0.75$ .....	105
3.1.2 Simulazioni per $J = 0.847$ .....	106
3.1.2 Simulazioni per $J = 0.90$ .....	107
3.2 Confronto con i dati sperimentali .....	108
3.2.1 Coefficienti relativi all'elica .....	108
3.2.2 Coefficienti relativi alla struttura del pod .....	112
3.3 Storie temporali dei coefficienti adimensionali ai tre $J$ studiati .....	117
3.3.1 Storie temporali dei coefficienti relativi all'elica .....	117
3.3.2 Storie temporali dei coefficienti relativi alla singola pala nell'ultimo giro dell'elica .....	123
3.3.3 Confronto storie temporali dei coefficienti relativi alla singola pala negli ultimi due giri di rotazione dell'elica .....	125
3.3.4 Confronto coefficienti mediati vs valori all'ultimo giro dell'elica.....	126
3.4 Campo di velocità $V_x$ in $Z = 0$ per $J = 0.847$ per $\psi$ da $0^\circ$ a $360^\circ$ .....	128
4. Analisi in configurazione <i>Push</i> per $J = 0.847$ .....	130
4.1 Coefficienti adimensionali .....	130
4.1.1 Risultati per $J = 0.847$ .....	131
4.2 Confronto con i dati sperimentali .....	132
4.2.1 Coefficienti relativi all'elica .....	132
4.2.2 Coefficienti relativi alla struttura del pod .....	134
4.3 Campo di velocità $V_x$ in $Z = 0$ per $J = 0.847$ per $\psi$ da $0^\circ$ a $360^\circ$ .....	136
5. Analisi delle azioni sulla struttura del Pod .....	139
6. Analisi delle prestazioni con <i>Virtual Disk</i> .....	141

6.1 Coefficienti adimensionali mediati .....	142
7. Confronto tra modelli.....	144
7.1 Confronto azioni risultanti sulla struttura del pod espresse dai diversi modelli utilizzati.....	144
7.2 Confronto su spinta e coppia espresse dai diversi modelli utilizzati.....	147
7.3 Campo di moto $V_x$ espresso dal modello con <i>Virtual Disk</i> e modello completo di elica .....	151
<b>Conclusioni e Sviluppi Futuri.....</b>	<b>153</b>
1. Conclusioni .....	153
1.1 Analisi di Convergenza .....	153
1.2 Analisi a $\psi = 0^\circ$ in configurazione <i>Pull</i> e <i>Push</i> .....	154
1.3 Analisi in configurazione <i>Pull</i> .....	154
1.4 Analisi in configurazione <i>Push</i> .....	155
1.5 Analisi sulla struttura del pod.....	156
1.6 Analisi di spinta e coppia .....	157
2. Sviluppi Futuri .....	157
<b>Bibliografia.....</b>	<b>159</b>

# Introduzione

Il propulsore azimutale o pod è un propulsore navale che può essere ruotato attorno ad un asse verticale Z, rotazione di un angolo di azimuth, e orientato in una qualsiasi direzione appartenente al piano orizzontale XY, rendendo inutile la presenza del timone su un'imbarcazione dotata di questo tipo di sistema.

A parità di nave, la presenza di un pod consente una maggiore manovrabilità, sia in termini di reattività che in termini di rotta, rispetto all'utilizzo di un sistema propulsivo convenzionale costituito da un'elica a pale fisse/variabili e da un timone. Il pod viene pertanto considerato come mezzo di governo integrato attivo e implementato prevalentemente su barche da lavoro, quali rimorchiatori o supply vessel, o più generalmente da imbarcazioni che necessitano di un'elevata manovrabilità.



Figura 1. Esempio di pod con elica in flusso libero.

Questo tipo di propulsore si costituisce di un corpo principale formato da: un prolungamento oltre lo scafo, Piede o Supporto, un corpo cilindrico che alloggia la trasmissione, Gondola, e dell'elica. Per indirizzare la spinta, il pod viene fatto ruotare attorno ad un asse Z passante per il Piede.

Dal punto di vista del tipo di elica, i sistemi azimutali possono essere:

- Con **eliche in flusso libero** (Figura 1); garantiscono un'efficienza maggiore e vengono utilizzati da navi che effettuano lunghe tratte di navigazione ma che necessitano di notevole manovrabilità (presenza di acque ristrette, necessità di indipendenza da rimorchiatori). Questi sistemi sono presenti di solito su navi da crociera o traghetti;
- Con **eliche intubate** (Fig. 2); garantiscono un'efficienza in manovra più importante in mare aperto, permettono una massimizzazione della spinta a punto fermo (*bollard pull*). Questi sistemi sono presenti di solito su rimorchiatori e supply vessel. [1]

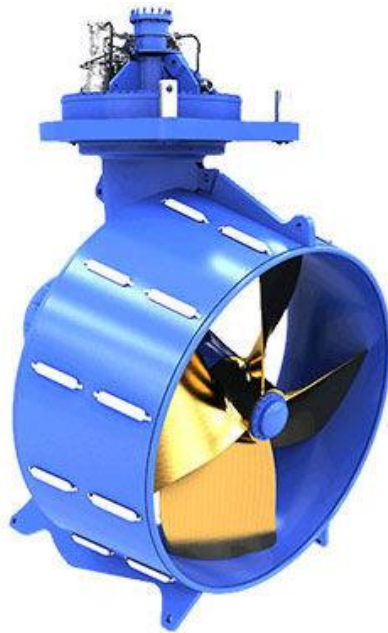


Figura 2. Esempio di pod con elica intubata.

La **trasmissione del moto** può essere meccanica, con rendimento della trasmissione inferiore, oppure elettrica, con motore elettrico posizionato nella Gondola; quest'ultimo sistema risulta più complesso ma permette una riduzione delle perdite meccaniche.

- **Trasmissione meccanica:** il motore si trova all'interno della nave e la trasmissione del moto al propulsore avviene mediante un sistema di ruote dentate e coppie coniche. Degli esempi ne sono i sistemi *L-Drive* e *Z-Drive*;
- **Trasmissione elettrica:** il motore elettrico è presente nello stesso propulsore, nella gondola; un esempio di applicazione famoso è l'*Azipod* [2].  
L'energia elettrica necessaria al funzionamento è prodotta da un motore a bordo, di solito Diesel, o da una GT (*Gas Turbine*).



Con l'inasprimento dei requisiti e delle normative in ambito navale, in termini di risparmio energetico e alla riduzione delle emissioni, ricercatori e progettisti si stanno focalizzando sull'uso della propulsione elettrica e altre tecnologie più efficienti dal punto di vista energetico. Da questo punto di vista i propulsori azimutali offrono non solo eccellenti performance idrodinamiche, ma anche considerevoli vantaggi rispetto ad altri tipi di propulsione, anch'essi in termini di efficienza della propulsione e di risparmio energetico [3].

Shi *et al.* (2010) hanno comparato e analizzato la rapidità e la manovrabilità di una nave mercantile equipaggiata prima da una propulsione convenzionale elica-timone e poi da un propulsore pod [3].

I loro studi hanno rivelato che la propulsione pod può migliorare significativamente la manovrabilità a basse velocità.

Rispetto ai comuni sistemi di propulsione convenzionali, quella azimutale è piuttosto insolita. Come già evidenziato, combina l'elica e il pod in un'unità propulsiva a sé. Essendo che il pod non necessita di un complesso sistema di trasmissione, la sua efficienza è alta, anche da un punto di vista della manovra, se confrontata con quella di un timone convenzionale. Inoltre, da un punto di vista strutturale, è relativamente semplice e offre diversi vantaggi, quali: smorzamento delle vibrazioni e un layout interno flessibile. [4]

I propulsori pod possono ruotare liberamente e generare spinta in ogni direzione, aumentando le capacità di manovra della nave.

A differenza delle eliche a passo fisso/variabile, e più in generale di sistemi di propulsione convenzionali, il comportamento idrodinamico dei propulsori azimutali non è però facilmente definibile.

Alcuni **aspetti critici** in termini di progettazione e di previsione delle prestazioni, in manovra e a regime, di imbarcazioni dotate di tali propulsori sono:

- Difficile previsione dell'**interazione Elica-Pod**, dal punto di vista delle prestazioni idrodinamiche, soprattutto in termini di influenza del flusso del pod sull'elica;
- Difficile previsione del **comportamento dinamico in manovra**, in termini di rotazione e velocità di rotazione del pod ai diversi angoli di azimuth;
- Scarsa conoscenza del **comportamento ai diversi angoli di rotazione**, in termini di forze e momenti, del pod in condizioni stazionarie;

- **Mancanza di una procedura standard di progettazione** e di matching con la carena di progetto, per una buona previsione della manovra della nave;
- Scarsa conoscenza del **comportamento alle alte velocità** e di conseguenza del **comportamento a cavitazione**.

Al fine di colmare queste lacune, diversi studi sono stati condotti per prevedere ed evidenziare il comportamento dei propulsori azimutali. Le ricerche sperimentali generalmente si sviluppano seguendo due approcci strettamente connessi:

- Effettuando **test al vero (*model test*)** - utilizzando modelli in scala o in vera grandezza;
- Effettuando analisi mediante **CFD (*Computational Fluid Dynamics*)** - modellando, a partire da dati sperimentali, il problema al computer e risolvendo in maniera approssimata le equazioni che descrivono il moto dei fluidi (*Navier-Stokes*).

## 1. Analisi sperimentali su *model test*

Le analisi sperimentali su *model test* vengono usualmente effettuate in **vasca navale**, ovvero un bacino d'acqua artificiale di geometria stabilita dal tipo di prova, che consente di effettuare analisi idrodinamiche sperimentali su modelli che simulano il comportamento reale dell'oggetto di studio.

Si tratta dello strumento più utilizzato nell'ambito dell'architettura navale. Sebbene con il passare degli anni le tecniche di simulazione numerica CFD diventino sempre più affidabili, la vasca navale costituisce, tutt'ora, il più affidabile strumento per la previsione del comportamento di carene, eliche navali e appendici.



Figura 3. Esempio di vasca navale.

Gli esperimenti principalmente svolti in vasca navale sono:

- **Prove a rimorchio di carena nuda** (senza eliche né appendici), necessaria a determinare alcune delle grandezze più importanti per la previsione del comportamento della nave, tra cui la resistenza al moto;
- **Prove di elica isolata**, necessaria a caratterizzare il funzionamento dell'elica indipendentemente da quello della carena;
- **Prove di autpropulsione;**
- **Prove su modello libero e su modello vincolato**, effettuate per determinare le caratteristiche idrodinamiche di manovra della carena in oggetto [1];
- **Prove nel tunnel di cavitazione** per lo studio del comportamento di eliche o appendici.

Quando l'impianto dispone di "battitori", generatori di onde artificiali, è possibile studiare anche il comportamento della nave in condizioni di mare ondoso.

Solitamente una vasca navale è costituita da un lungo bacino in calcestruzzo in cui sui lati lunghi sono presenti due binari, su di essi si sposta una struttura detta carro dinamometrico. Durante una tipica prova di rimorchio, il carro dinamometrico trascina secondo un moto rettilineo uniforme, le cui variabili cinematiche sono stabilite a priori, il modello di carena in esame, cui è collegato mediante particolari giunti meccanici.

Grazie a tali giunti è possibile effettuare le misurazioni delle grandezze fisiche di interesse, per esempio la resistenza al moto.

Queste grandezze vengono registrate durante tutta la prova e sono poi rielaborate al computer mediante opportuni software.

Il carro dinamometrico può essere costruito in modo tale da poter ospitare, durante le prove, oltre a tutta la strumentazione di misurazione, anche i tecnici che lo controllano.

Più la vasca navale è grande, migliore sarà la qualità dei dati sperimentali ottenuti. Infatti, il tratto iniziale e quello finale del bacino sono porzioni necessarie all'accelerazione e alla decelerazione del carro dinamometrico ne consegue che una vasca più lunga dà la possibilità di provare un modello a velocità uniforme per un tempo più lungo e senza inoltre inficiare i risultati delle prove a causa del *mirror effect*.

La larghezza e la profondità del bacino sono invece importanti al fine di ridurre possibili fenomeni di interazione tra il modello e le pareti della vasca, che porterebbero a risultati fittizi.

Le vasche navali possono raggiungere dimensioni notevoli, con lunghezze superiori al chilometro; vengono anche effettuate in specchi d'acqua reali (Lago di Nemi).

Lo studio delle prestazioni di carene, eliche e appendici in vasca navale ha origini molto antiche e intorno alla seconda metà del 1900 ha visto il culmine del proprio impiego.

La presenza di diversi bacini in tutto il mondo ha portato la nascita dell'*International Towing Tank Conference* (ITTC), al fine di uniformare i risultati degli esperimenti condotti dai diversi impianti.

Gli studi condotti in vasca, sotto la supervisione dell'ITTC, hanno portato alla creazione di curve di regressione numerica, utili per il calcolo della resistenza al moto delle carene, fin dagli anni 60'. Formule che vengono utilizzate ancora oggi in ambito navale nelle fasi preliminari della progettazione, per esempio al fine di avere una stima della resistenza al moto alla quale è soggetta l'imbarcazione alla velocità di progetto.

Per quanto riguarda, però, il comportamento dei propulsori azimutali, fin dalla loro uscita nel mondo navale, la quantità di prove risulta molto inferiore rispetto a quelle effettuate per carene ed eliche isolate. Questo a causa del comportamento difficilmente prevedibile di questi sistemi, come evidenziato nel paragrafo precedente.

I primi studi sperimentali in vasca su pod risalgono alla fine degli anni 90' ad opera della *U.S. Navy*. Nel 1998 è stato effettuato uno dei primi studi sperimentali sui propulsori azimutali, al fine di studiare il suo comportamento a cavitazione e per aumentare le performance propulsive delle imbarcazioni equipaggiate da tale sistema [5].

Uno degli studi più importanti è quello effettuato da Hans-Jürgen Heinke (2004), durante il quale sono stati fatti dei *model test* su un pod equipaggiato da due tipi di elica, a quattro e a cinque pale, in configurazione Push (elica che spinge posta dietro alla gondola e al piede) e in configurazione Pull (elica che tira posta davanti alla gondola e al piede) [6].

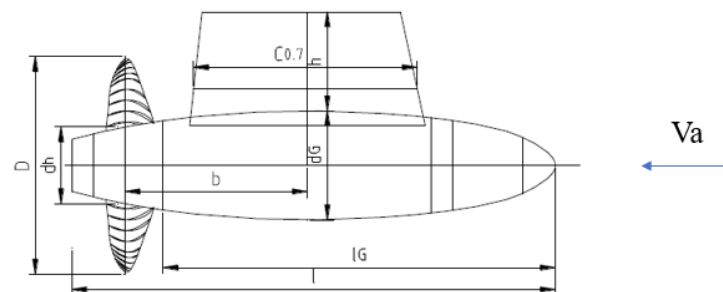


Figura 4. Elica in configurazione Push.

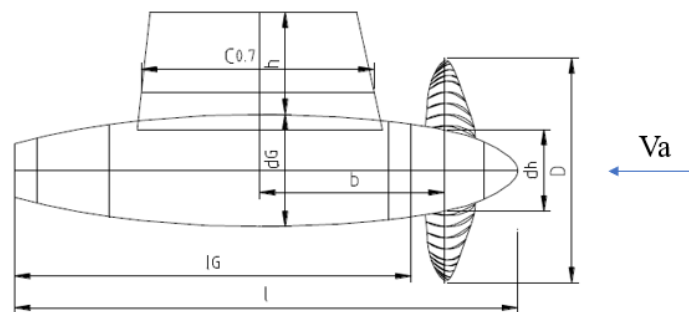


Figura 5. Elica in configurazione Pull.

Un dinamometro *Z-drive* e una bilancia a sei componenti, dispositivo in grado di misurare le tre componenti della forza (lift, drag e side) e del momento (pitch, roll e yaw) agenti sul corpo, sono stati utilizzati per effettuare le misure nella vasca e nel tunnel di cavitazione.

Per mezzo dei dati estratti è stata studiata l'influenza geometrica del supporto sulle prestazioni dell'elica, l'interazione tra l'elica e il pod e le caratteristiche idrodinamiche dell'intera struttura per un intervallo di angoli da  $0^\circ$  a  $360^\circ$ .

I diversi valori delle forze e dei momenti agenti sulla struttura in condizioni push o pull sono stati calcolati sulla base di test sistematici *open water*, di elica isolata, ai diversi angoli di azimuth.

Per la previsione delle prestazioni della propulsione azimutale durante la manovra di crash stop sono state effettuate, inoltre, delle prove con elica bloccata ad elevati valori del coefficiente d'avanzo.

Un altro studio sperimentale, ad opera di Islam et al. (2009) [7] è stato condotto al fine di investigare le performance dei propulsori azimutali. Gli esperimenti sono stati fatti considerando per i test differenti geometrie a differenti angoli di rotazione del pod, in configurazione push e in configurazione pull, in condizioni *open water*.

Le analisi hanno valutato le prestazioni del sistema propulsivo azimutale variando cinque parametri geometrici diversi, mettendo in evidenza gli effetti sulla spinta dell'elica, sulla coppia e sull'efficienza, e sulla spinta e l'efficienza del sistema pod-elica complessivo.

In una seconda parte della ricerca si sono inoltre concentrati sulle prestazioni idrodinamiche del pod in condizioni statiche e dinamiche ai vari angoli di azimuth.

Nello specifico, lo studio si è diviso in due parti:

- Nella **prima parte** sono stati testati due pod, in scala al vero, per misurare le forze e i momenti agenti sull'elica e sull'unità complessiva a diversi angoli di azimuth in un range da  $-30^\circ$  a  $+30^\circ$ ;
- Nella **seconda parte** un dinamometro ha misurato le forze e i momenti di un modello in scala ridotta di un pod a differenti condizioni di azimuth, in configurazione statica e dinamica, in un range di angoli da  $0^\circ$  a  $360^\circ$ .

Gli studi hanno evidenziato che la variazione dei parametri geometrici ha molta influenza sulle caratteristiche propulsive del sistema.

In condizioni statiche, per gli angoli di azimuth da  $-30^\circ$  a  $+30^\circ$ , i coefficienti propulsivi dell'elica e del sistema complessivo cambiano con la variazione del carico sull'elica e ai vari angoli di azimuth.

In condizioni dinamiche di rotazione del pod, i coefficienti propulsivi dell'elica e del sistema hanno mostrato una forte dipendenza in funzione di quanto viene caricata l'elica e in funzione dell'angolo di azimuth.

Diversi studi sperimentali su pod sono stati effettuati negli ultimi anni, tutti volti a studiare il comportamento del sistema in condizioni *off-design* e il comportamento dinamico in manovra variando la velocità di rotazione, dell'angolo di azimuth.

Si può citare, in tal senso, lo studio di Zhao et al. (2019) che ha effettuato una serie di test sperimentali per valutare le prestazioni idrodinamiche di un pod *L-drive* in condizioni statiche e dinamiche ai diversi angoli di azimuth [8].

Quest'analisi ha messo in luce un'asimmetria, dal punto di vista delle forze, quando il pod viene ruotato verso destra oppure verso sinistra.

L'analisi del comportamento dei propulsori azimutali, operata per via sperimentale, risulta però molto onerosa dal punto di vista dei costi e dei tempi.

Con l'incremento delle prestazioni dei computer, fin dalla fine degli anni '90, ha preso piede, parallelamente agli studi in vasca navale, l'analisi mediante simulazioni numeriche.

## 2. Simulazioni numeriche

Le **simulazioni numeriche** consistono nella trasposizione al computer del problema in esame, che può essere il calcolo della spinta prodotta da un'elica, e della sua soluzione mediante specifiche teorie matematiche.

Questa metodologia appartiene a quella branca della matematica, che prende il nome di *analisi numerica*, che risolve, mediante approssimazione, i modelli prodotti dall'analisi matematica.

Quest'ultimo concetto assume una rilevanza particolarmente importante: i risultati ottenuti mediante simulazioni numeriche sono **approssimati** e fortemente dipendenti dall'impostazione del problema; quindi, non hanno validità generale come la soluzione analitica esatta di un'equazione.

Ne consegue che, sebbene i benefici delle simulazioni numeriche al computer siano molteplici, bisogna sempre considerare che la loro validità è limitata da come si è modellato

il problema e dalla possibilità di avere un riscontro reale effettivo di ciò che si deve rappresentare.

Tuttavia, la diffusione di questo strumento è dovuta a due principali vantaggi rispetto alle analisi in vasca:

- I **costi** sono ridotti, si limitano al solo computer, all'energia elettrica necessaria per alimentarlo e alla licenza del programma con cui si effettuano le simulazioni. Al contrario, per effettuare delle prove in vasca si aggiungono, per esempio, i costi per alimentare e gestire l'impianto. Questo è rilevante soprattutto per le aziende desiderose di farsi le analisi in autonomia;
- I **tempi** sono notevolmente ridotti. Per una corretta simulazione numerica bastano poche ore in certi casi. Dipende ovviamente dal tipo di problema in esame;

Nell'ambito dell'architettura navale le analisi numeriche si concentrano sulla risoluzione delle equazioni del moto dei fluidi (*Navier Stokes*), la cui soluzione analitica in forma chiusa rappresenta uno dei problemi irrisolti della matematica moderna.

Soluzioni analitiche particolari si hanno effettuando pesanti semplificazioni, mentre, appunto, ricorrendo ai metodi propri dell'analisi numerica, e all'uso congiunto del calcolatore, si ottengono buone soluzioni approssimate.

Le simulazioni numeriche di fatto approssimano le equazioni, discretizzando il dominio del problema.

Uno dei metodi più semplici, utilizzato nell'ambito delle simulazioni numeriche, è la **teoria a potenziale**, che descrive il campo della velocità come gradiente di una funzione scalare detta potenziale; questo a partire da diverse ipotesi, quali l'irrotazionalità del fluido per esempio.

Questa teoria trova riscontro nello studio di flussi esterni su superfici idrodinamiche, aereodinamiche e di onde marine.

Nell'ambito dello studio dei propulsori azimutali si possono evidenziare alcuni studi effettuati nel verso la fine degli anni '80/inizio '90, fatti sulla base della teoria della linea portante e del metodo a pannelli.

Per esempio, un'analisi ad opera di Chang et al. (1989) ha studiato il comportamento di un disco attuatore per simulare il flusso stazionario agente sull'elica [3].



Per lo studio di flussi, fenomeni dove si rileva la presenza di marcati effetti vorticosi, questo tipo di approssimazione non è utilizzabile.

Questo concetto è particolarmente importante e si connette strettamente allo studio dei propulsori azimutali; si può osservare infatti che:

- Ad elevate velocità, per effetti geometrici, i fenomeni vorticosi generati dal flusso incidente sulla struttura del pod sono molto rilevanti;
- Ad angoli di azimuth diversi da  $0^\circ$  si innescano, a velocità anche ridotte, turbolenze importanti.

Le simulazioni numeriche recenti si avvalgono principalmente della **CFD (*Computational Fluid Dynamics*)**.

La fluidodinamica computazionale o numerica utilizza l'analisi numerica e una serie di algoritmi per risolvere i problemi della meccanica dei fluidi, avvalendosi della potenza computazionale dei computer.

Nello specifico, il suo principale impiego è risolvere, secondo alcuni metodi, le *equazioni di Navier-Stokes*.

Per la campagna di simulazioni condotta per questa tesi, è stato utilizzato il **metodo RANS**, che si assume di scomporre il moto turbolento in due parti: un moto medio e una sua fluttuazione nel tempo. Le grandezze delle equazioni vengono mediate in un dato intervallo di tempo, riducendo così i tempi di calcolo.

Le equazioni vengono approssimate secondo il *metodo dei volumi finiti*, in particolare si risolve il campo di moto in un volume di controllo discretizzato da un numero finito di celle.

L'impiego della CFD per lo studio dei pod è di fatto uno degli strumenti più utilizzati.

Viene pubblicato, da Sanchez et al. (2004), uno studio focalizzato sullo studio delle prestazioni di propulsori azimutali per navi mercantili con requisito elevate velocità di progetto (35-38 *knots*) [9].

Per questi regimi del campo di moto il sistema propulsivo costituito da elica più struttura del pod diventa particolarmente sensibile in termini di cavitazione.

Lo studio, mediante l'utilizzo di un metodo RANS, ha studiato un processo di ottimizzazione delle forme della struttura formata dal piede e dalla gondola del pod.

Il numero di celle utilizzate per la discretizzazione del dominio di studio è stato di 430'000 celle per i calcoli preliminari e solo verso la fine dello studio si è utilizzata una mesh più fitta da 3.4 milioni di celle.

Un importante studio, Zhang et al. (2023) [4], ha effettuato delle simulazioni numeriche secondo un approccio RANS con modello di soluzione della turbolenza  $k - \omega$ .

L'analisi di convergenza, necessaria per stabilire la validazione di un modello CFD, è stata effettuata sulla base dei risultati dell'analisi sperimentale condotta in vasca da Zhao et al. (2019) [8], dove il modello indagato era un pod *L-type*.

Le simulazioni numeriche sono state condotte utilizzando il software STAR-CCM+, impiegato, nello specifico, per analizzare le forze e le coppie agenti sulle pale dell'elica in condizioni stazionarie e di manovra ai diversi angoli di azimuth.

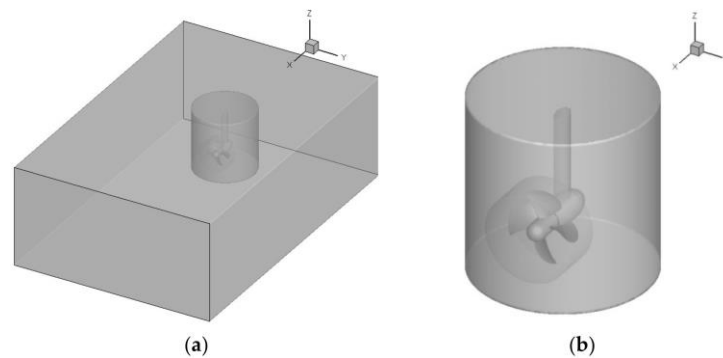


Figura 6. Dominio di calcolo: (a) complessivo (b) sottodominio cilindrico di rotazione.

Come si può vedere in Figura 6, il dominio di calcolo è stato realizzato definendo due regioni distinte: una rappresentativa del dominio esterno e una interna per andare a indagare la rotazione del pod attorno all'asse Z secondo i diversi angoli di azimuth.

Lo studio ha indagati principalmente un unico valore del coefficiente d'avanzo  $J = 0.2$  in condizioni stazionarie e di manovra.

Ed è stato evidenziato un errore sul coefficiente di spinta  $K_{Tp}$  pari al 3% rispetto al valore misurato sperimentalmente e un errore massimo del 7% sul coefficiente di momento  $K_{Qp}$ .

Dove:

$$K_{Tp} = \frac{T}{\rho n^2 D^4}$$

$$K_{Qp} = \frac{Q}{\rho n^2 D^5}$$

$$J = \frac{V_A}{nD}$$

Mentre:

<b>Densità dell'acqua</b>	<b><math>\rho</math> [Kg/m<sup>3</sup>]</b>
<b>Numero di giri</b>	<b><math>n</math> [rpm]</b>
<b>Velocità del flusso agente</b>	<b><math>V_A</math> [m/s]</b>
<b>Spinta</b>	<b><math>T</math> [N]</b>
<b>Coppia esercitata dall'elica</b>	<b><math>Q</math> [kN*m]</b>

Tabella 1. Grandezze dimensionali caratteristiche di elica isolata.

### 3. Equazioni governanti del problema

Per spiegare meglio alcuni concetti menzionati in precedenza, su tutti le *equazioni di Navier-Stokes*, si illustrano, nel seguente paragrafo, alcuni elementi di base della meccanica dei fluidi [10].

#### 3.1 Modello del continuo

I fluidi sono composti da molecole situate a grandi distanze rispetto alle proprie dimensioni. Essendo quindi per natura mezzi discontinui, in un punto particolare dello spazio non è possibile definire con precisione le proprietà di un fluido, perché in tale punto potrebbe non esserci fluido (materia) o potrebbe trovarsi una particolare molecola dotata di una sua massa, di una sua velocità.

Al tempo stesso in un punto limitrofo si potrebbero misurare le caratteristiche fisiche di una particolare molecola che però non denotano le grandezze globali della massa fluida.

È possibile prescindere da questo carattere discontinuo della materia, se si prende in considerazione un volume che contiene un numero elevato di molecole e si definiscono delle grandezze medie.

Tenuto conto che il volume di questo insieme di molecole è inferiore all'ordine di grandezza delle dimensioni di interesse dello studio della meccanica dei fluidi, difatti ciò che avviene a livello molecolare non è di nostro interesse.

Prenderemo in considerazione d'ora in avanti la particella fluida ovvero una porzione di fluido di dimensioni opportunamente scelte, alla quale, durante un intervallo di tempo  $\Delta t$  intorno ad un certo istante  $t$  corrispondono certi valori di densità, di velocità, di pressione e in generale di qualunque altra grandezza.

Valori che, per convenzione si assegnano al centro d'inerzia della particella per l'istante  $t$  considerato.

A causa dell'interazione tra le molecole che costituiscono la materia nascono forze di diversa natura. I sistemi continui sono caratterizzati da due tipologie di forze, le forze di superficie e le forze di massa.

All'interno della categoria delle forze di massa rientrano tutte le forze esterne al volume di fluido considerato. Sono il risultato delle forze a lungo raggio, rimangono importanti anche quando le molecole si trovano a distanza significativa rispetto al proprio raggio e sono proporzionali alla quantità di massa fluida presa in considerazione.

La principale di queste forze è la forza di gravità, che denota il peso della massa fluida. Le forze di superficie invece sono tutte le forze che dipendono dalla superficie di contorno del volume fluido. Assumono valori significativi solo quando le molecole fluide si trovano a distanza dell'ordine delle loro dimensioni e sono proporzionali alla superficie considerata.

### **Cinematica dei fluidi e sistemi di riferimento.**

Si consideri un sistema di riferimento cartesiano fisso nello spazio  $(x_1, x_2, x_3)$ .  $V(t)$  è un volume di fluido in movimento che all'istante  $t_0$  occupa la regione  $V_0$  e  $(X_1, X_2, X_3)$  la posizione della generica particella di fluido rispetto al sistema di riferimento  $(x_1, x_2, x_3)$ .

Una qualunque grandezza  $F$  del fluido può essere descritta utilizzando due funzioni:

- Descrizione Lagrangiana;  $F = f_1(X_1, X_2, X_3, t)$
- Descrizione Euleriana;  $F = f_1(x_1, x_2, x_3, t)$

Nel caso si utilizzi una descrizione Lagrangiana, ovvero fissando i valori di  $X_1, X_2, X_3$ , è come se si osservasse l'evoluzione della grandezza  $F$  relativa a una particolare particella fluida che al variare del tempo occuperà posizioni diverse nello spazio.

Fissando invece i valori di  $(x_1, x_2, x_3)$ , ovvero adottando una descrizione Euleriana si ottiene una funzione che descrive la variazione della grandezza  $F$  relativa a un solo punto nello spazio che al variare del tempo sarà occupato da particelle fluide diverse.

Per la risoluzione dei nostri problemi non è di interesse il comportamento di ogni singola particella fluida ma la conoscenza dei valori di velocità e di pressione lungo determinate superfici, per questo adottiamo una descrizione Euleriana del moto del fluido.

Fissata quindi una terna di riferimento di assi  $x, y, z$ , definiamo le componenti del vettore velocità in un generico punto dello spazio, ovvero le seguenti quantità:

$$u = \frac{dx}{dt}; \quad v = \frac{dy}{dt}; \quad w = \frac{dz}{dt}$$

Il campo di moto di un fluido è completamente definito attraverso l'espressione

$V = v(x, y, z, t)$ , infatti essa fornisce ad ogni singolo istante temporale  $t$  le caratteristiche del moto in tutti i punti dello spazio occupato dal fluido.

### **Grandezze cinematiche.**

Per sua natura lo studio della dinamica dei fluidi risulta molto complesso, descritto attraverso sistemi di equazioni differenziali. Il moto a valle di un'elica navale risulta essere caotico e turbolento caratterizzato da componenti di velocità sia radiali rispetto il raggio dell'elica, che assiali.

Per questo ci si avvale di alcuni elementi caratteristici del moto dei fluidi quali:

- Traiettorie;
- Linee di corrente.

Le traiettorie sono le linee luogo dei punti occupati dalle singole particelle fluide al variare del tempo, sono un concetto tipicamente Lagrangiano, sono ricavabili dalle seguenti equazioni:

$$dx = u(x, y, z, t)dt; \quad dy = v(x, y, z, t)dt; \quad dz = w(x, y, z, t)dt$$

Per ottenere la traiettoria di una particella fluida si risolve questo sistema composto da tre equazioni, introducendo come condizione al contorno la posizione relativa a una particella  $(x_1, y_1, z_1)$  a un certo istante  $t_1$ .

La singola linea di corrente è la curva tangente in ogni punto al vettore velocità. Per ogni punto del campo di moto passa una e una sola linea di corrente, esse si ricavano integrando l'equazione  $dxXv(x, t) = 0$ .

Le linee di corrente son ben distinte dalle traiettorie, in quanto le componenti  $u, v, w$  della velocità sono dipendenti dal tempo e quindi variabili da istante a istante, di conseguenza le linee di corrente cambiano forme al variare dell'istante di tempo considerato.

Le traiettorie rappresentano le posizioni successivamente assunte nel tempo da singole particelle. Le linee di corrente definiscono le velocità nei diversi punti del campo di moto in un determinato istante.

## 3.2 Principi della meccanica dei fluidi

### Il principio di conservazione della massa.

Il principio di conservazione della massa è valido per qualsiasi massa fluida in movimento, lega i caratteri cinematici del processo di moto con la densità del fluido, per questo motivo prende anche il nome di equazione di continuità. Prendiamo un volume infinitesimo  $dV$ , la massa infinitesima associata al volume infinitesimo sarà quindi  $\rho dV$ .

La massa del volume materiale complessivo di fluido  $V(t)$  sarà  $M(t) = \int_{V(t)} \rho dV$ , il principio di conservazione della massa impone che  $M$  sia costante nel tempo:

$$\frac{d}{dt} \int_{V_0} \rho dV = 0$$

Applicando il teorema del trasporto si ottiene:

$$\int_{V_0} \frac{\partial \rho}{\partial t} dV_0 + \int_{S_0} \rho(v \cdot n) dS_0 = 0$$

Si riconosce il termine  $\int_{S_0} \rho(v \cdot n) dS_0$  come la quantità di fluido che attraversa la superficie  $S_0$  nell'intervallo di tempo che prende il nome di portata massica.

Il principio della quantità di moto impone quindi:

$$\int_{S_0} \rho(v \cdot n) dS_0 = - \int_{V_0} \frac{\partial \rho}{\partial t} dV_0$$

La derivata temporale della massa, contenuta all'interno di  $V_0$  e cambiata di segno, deve eguagliare la portata massica.

### **Principio della quantità di moto.**

Preso un volume infinitesimo di fluido  $dV$  la massa infinitesima associata risulta essere  $\rho dV$ , la quantità di moto invece a  $\rho v dV$ . La quantità di moto dell'intero volume di fluido sarà dunque la somma di tutti i componenti infinitesimi  $\int_V \rho v dV$ . Il principio della quantità di moto impone:

$$\frac{d}{dt} \int_{V(t)} \rho v dV = \int_{V(t)} \rho f dV + \int_{S(t)} t dS$$

Applicando il teorema del trasporto si ottiene **l'Equazione integrale della quantità di moto**:

$$\int_{V_0} \frac{\partial \rho v}{\partial t} dV_0 + \int_{S_0} \rho v(vn) dS_0 = \int_{V_0} \rho f dV_0 + \int_{S_0} t dS_0$$

Che può anche essere riscritto come  $I + M = H + \pi$ , dove i termini indicano:

- $I = \int_{V_0} \frac{\partial \rho v}{\partial t} dV_0$  è il termine di inerzia locale;
- $M = \int_{S_0} \rho v(vn) dS_0$ , presa  $S_0$ ,  $M$  è il flusso di quantità di moto;
- $G = \int_{V_0} \rho f dV_0$  è la risultante delle forze di massa sul volume  $V_0$ ;
- $\pi = \int_{S_0} t dS_0$  è la risultante delle forze di superficie agenti sulla superficie  $S_0$ .

### 3.3 Fluidi Viscosi

Lo stato di sforzo di un continuo fluido può essere ricavato come la sovrapposizione di due distinti contributi: un contributo generato dalla sola componente idrostatica, la pressione, e un secondo contributo dovuto invece dalla viscosità del fluido, che trae origine solo dal movimento degli elementi fluidi.

Il tensore delle tensioni in questo caso può essere espresso come somma di due tensori: uno che tiene conto della componente idrostatica, e sarà un tensore diagonale, e uno che è associato alla viscosità del fluido.

$$\begin{bmatrix} T_{xx} & T_{xy} & T_{xz} \\ T_{yx} & T_{yy} & T_{yz} \\ T_{zx} & T_{zy} & T_{zz} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} p & 0 & 0 \\ 0 & p & 0 \\ 0 & 0 & p \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} T_{xx}-p & T_{xy} & T_{xz} \\ T_{yx} & T_{yy}-p & T_{yz} \\ T_{zx} & T_{zy} & T_{yy}-p \end{bmatrix}$$

Figura 7. Tensore delle tensioni in un fluido viscoso.

Si nota che nel momento in cui il fluido si trova in uno stato di quiete, il secondo termine a secondo membro si annulla, rimanendo il solo primo tensore a testimoniare l'esistenza dell'equilibrio idrostatico.

Lo stato di tensione, infatti, si riduce a uno stato isotropo. Un fluido reagisce con una distribuzione di tensioni interne a un suo stato di velocità di deformazione, causata da una non uniforme distribuzione di velocità. La materia tende sempre a cercare un equilibrio opponendosi alle forze applicate, i fluidi tendono a eliminare la velocità di deformazione tramite la nascita di questo stato interno tensionale.

Questo discorso rappresenta il concetto di fluidità, ad esso sono associati gli assiomi dei fluidi costitutivi dei fluidi viscosi riportati qui di seguito.

Prima si definisce:  $\mathbf{T}$  tensore delle tensioni,  $\mathbf{D}$  tensore delle deformazioni.

- $\mathbf{T}$  è una sola funzione di  $\mathbf{D}$ ,  $\mathbf{T} = f(\mathbf{D})$ , è indipendente da qualsiasi altra grandezza cinematica. Inoltre,  $\mathbf{T} = f(\mathbf{D})$  è invariante rispetto a una variazione del sistema di riferimento;
- Proprietà di omogeneità:  $\mathbf{T}$  non dipende esplicitamente dalla posizione  $\mathbf{x}$ ;



- Proprietà di isotropia, non ci sono direzioni preferenziali di deformazione;
- Se il fluido è in quiete allora  $D = 0$  e  $T = -pI$ .

I fluidi che presentano queste caratteristiche sono detti **Fluidi di Stokes** e saranno quelli utilizzati per questo studio.

### **Legame costitutivo dei fluidi viscosi.**

Questi assiomi conducono al legame costitutivo:

$$T = (\alpha - p)I + \beta D + \gamma D^2$$

Aggiungendo l'ipotesi di linearità del legame costitutivo si ottiene la forma:

$$T_{ij} = -p + \lambda \frac{\partial v_k}{\partial x_k} \delta_{ij} + 2\mu D_{ij}$$

Riscritta in forma vettoriale prendendo il nome di *legge di Newton-Cauchy-Poisson*:

$$T = (-p + \lambda \Delta v)I + 2\mu D$$

Le quantità  $\mu$  e  $\lambda$  prendono il nome di primo e secondo coefficiente di viscosità, non dipendono dallo stato termodinamico del fluido e la loro unità di misura è  $Nsm^{-2}$ . Fisicamente  $\mu$  rappresenta l'intensità della risposta dinamica alla velocità di deformazione ed è detta viscosità dinamica. Una seconda proprietà è  $\nu$  che controlla la rapidità con cui gli effetti viscosi si propagano nel fluido ed è detta viscosità cinematica, l'unità di misura è  $ms^{-1}$ . Le due grandezze sono legate tra loro dalla relazione  $\nu = \frac{\mu}{\rho}$ .

### **Il problema del moto e le equazioni di Navier-Stokes.**

Si prende il volume di fluido che occupa la regione dello spazio  $V(t)$ , caratterizzata dalla frontiera  $S(t)$ . Ne vogliamo dedurre le equazioni che ne governano il moto. Si parte dalle equazioni del moto di Cauchy valide per qualsiasi corpo continuo rispettante l'assioma di Cauchy:

*Su ogni superficie chiusa immaginaria  $S$ , di versore normale  $n$ , contenuta in  $V$  esiste una distribuzione di vettori tensione  $t$  il cui risultante e momento risultano equivalenti al risultante e momento dell'effettivo sistema di forze in cui si traduce l'azione della materia posta esternamente ad  $S$  su quella contenuta internamente.*

Postulando l'esistenza del tensore  $t$  matematicamente si traduce con due Assiomi:

$$t = \lim_{\delta S \rightarrow 0} \frac{\delta R}{\delta S}$$

$$\lim_{\delta S \rightarrow 0} \frac{\delta M}{\delta S} = 0$$

Dove  $\delta R$  è la risultante delle forze agenti sulla porzione  $\delta S$  di  $S$  da parte del fluido esterno. Mentre  $\delta M$  è la risultate dei momenti sulla porzione  $\delta S$ . Attraverso passaggi matematici, sfruttando l'arbitrarietà del volume considerato e la trasformazione di Gauss, si arriva a scrivere l'equazione del moto di Cauchy valida per qualsiasi continuo, che rispetta gli assiomi sopra riportati:

$$\rho \frac{dv_k}{dt} = \rho f_k + \frac{\partial T_{ij}}{\partial x_j}$$

Introducendo il legame costitutivo ricavato nel precedente paragrafo nelle equazioni di Cauchy si ottiene l'espressione:

$$\rho \frac{dv_k}{dt} = \rho f_k + \delta_{jk} \frac{\partial}{\partial x_j} \left( -p + \lambda \frac{\partial v_i}{\partial x_i} \right) + 2\mu D_{jk}$$

Riscritta in forma vettoriale come:

$$\rho \frac{dv}{dt} = \rho f - \nabla(p - \lambda \nabla v) + \nabla(2\mu D)$$

Assumendo che  $\lambda$  e  $\mu$  siano indipendenti dalla posizione, ovvero che la distribuzione di pressione e temperatura sia uniforme e ponendo la condizione di uguaglianza delle derivate seconde miste si arriva alla forma vettoriale finale:

$$\rho \frac{dv}{dt} = \rho f - \nabla p + (\lambda + \mu)\nabla(\nabla v) + \mu\nabla^2 v$$

Per la seguente trattazione è assunta l'ipotesi di fluido incomprimibile, ovvero un fluido che non varia la sua densità nel tempo e nello spazio. Questo porta fisicamente ad avere la derivata totale  $\frac{d\rho(x,t)}{dt} = 0$  per ogni istante  $t$  considerato. Questo porta matematicamente ad avere  $\nabla u = 0$ .

Le equazioni di Navier-Stokes da risolvere, e che governano il nostro problema, diventano in notazione indiciale:

$$\rho \frac{dv_k}{dt} = \rho f_k + \frac{\partial p}{\partial x_k} + \mu \frac{\partial^2 v_k}{\partial x_j \partial x_k}$$

E in forma vettoriale:

$$\rho \frac{dv}{dt} = \rho f - \nabla p + \mu\nabla^2 v$$

Queste ultime espressioni sono le equazioni di Navier-Stokes; esse costituiscono un sistema di equazioni alle derivate parziali non lineari, composto da cinque equazioni e ventuno incognite. Descrivono il comportamento di un fluido viscoso a livello macroscopico in ogni punto del dominio considerato.

Come tutte le equazioni differenziali, la soluzione particolare può essere determinata solo mediante opportune condizioni al contorno.

### **Condizioni al contorno.**

In corrispondenza dell'interfaccia tra un fluido e un altro mezzo bisogna imporre una condizione al contorno. Infatti, è richiesta la continuità della componente della velocità tangente al contorno, ovvero che la componente della velocità del fluido tangente all'interfaccia risulti uguale alla componente di velocità del solido.

In presenza di un contorno solido, come nel caso di nostro interesse, la componente di velocità normale alla frontiera deve annullarsi. Questa condizione prende il nome di

*Condizione di non-compenetrazione*; essa assicura che non avvenga né la compenetrazione né il distacco del fluido dal contorno solido. Matematicamente si traduce imponendo  $v\Delta F = 0$ .

A causa della natura non lineare delle equazioni non è ancora stata trovata una soluzione in forma chiusa, a meno di introdurre ipotesi molto pesanti; si è solo riusciti a dimostrare che la soluzione esiste ed è unica. Per ottenere una soluzione, senza cadere in casi banali di studio, l'unica strada possibile è avvalersi della *Computational Fluid Dynamics*, che grazie alle moderne capacità computazionali fornisce una soluzione numerica, approssimata, al sistema di equazioni.

## **4. Approccio alla CFD**

Come verrà illustrato in seguito, il problema di cui tratta questa tesi verrà risolto avvalendosi di un software CFD (STAR-CCM+). Pertanto, nel seguente paragrafo, vengono illustrati alcuni elementi della teoria che sta alla base delle simulazioni numeriche volte alla risoluzione dei problemi nell'ambito dell'idrodinamica computazionale.

La *Computational Fluid Dynamics* è costituita da una serie di procedure numeriche atte a risolvere e analizzare problemi di fluidodinamica. È costituita, quindi, da tutti quei metodi che permettono di identificare la conoscenza delle variabili di stato di un fluido (pressione e velocità), fornendo la piena conoscenza del campo di moto, in ogni punto del dominio di nostro interesse.

L'impiego principale della fluidodinamica computazionale è la semplificazione delle equazioni di Navier-Stokes e di quelle ad esse correlate. Il fine ultimo è, quindi, quello di risolvere dal punto di vista numerico un problema continuo governato da equazioni differenziali.

Compatibilmente con la sua natura chimico-fisica, un problema di questo genere è descrivibile mediante un numero infinito di informazioni, concetto che non si sposa con l'operatività di un calcolatore che è invece in grado di elaborare solo un numero finito di informazioni.

Urge pertanto l'esigenza di trasformare il problema da continuo a un problema discreto, approssimando le equazioni differenziali che lo governano in equazioni algebriche in modo da poterlo processare e implementare in un codice di calcolo numerico.

È importante evidenziare che la validità del risultato numerico dipende dall'accuratezza della discretizzazione utilizzata; il tutto va poi bilanciato con le risorse di calcolo computazionale a disposizione e di conseguenza del tempo necessario al raggiungimento della soluzione cercata.

Infatti, come si evidenziava nei paragrafi precedenti, la soluzione numerica contiene sempre delle differenze rispetto alla soluzione reale che si otterrebbe mediante la risoluzione analitica delle equazioni del moto dei fluidi.

Questi errori si generano inevitabilmente durante le fasi di trasformazione del problema da continuo a discreto in conseguenza delle inevitabili approssimazioni per poter ottenere la soluzione numerica.

Le approssimazioni sono intrinseche al processo di discretizzazione; inoltre, per risolvere le equazioni discretizzate vengono utilizzati metodi iterativi che permettono di raggiungere risultati validati con un range di errore.

Si effettua la conversione del problema da continuo a discreto per step:

- Definizione del modello matematico adottato;
- Definizione del dominio di calcolo;
- Discretizzazione del dominio;
- Discretizzazione dell'equazioni che governano il problema.

Il punto di partenza di qualsiasi metodo numerico è il **modello matematico**, costituito dall'insieme delle equazioni, e relative condizioni al contorno, adottate per descrivere il problema. Il modello matematico adottato per il seguente studio è stato presentato nel paragrafo0 *Equazioni governanti del problema*.

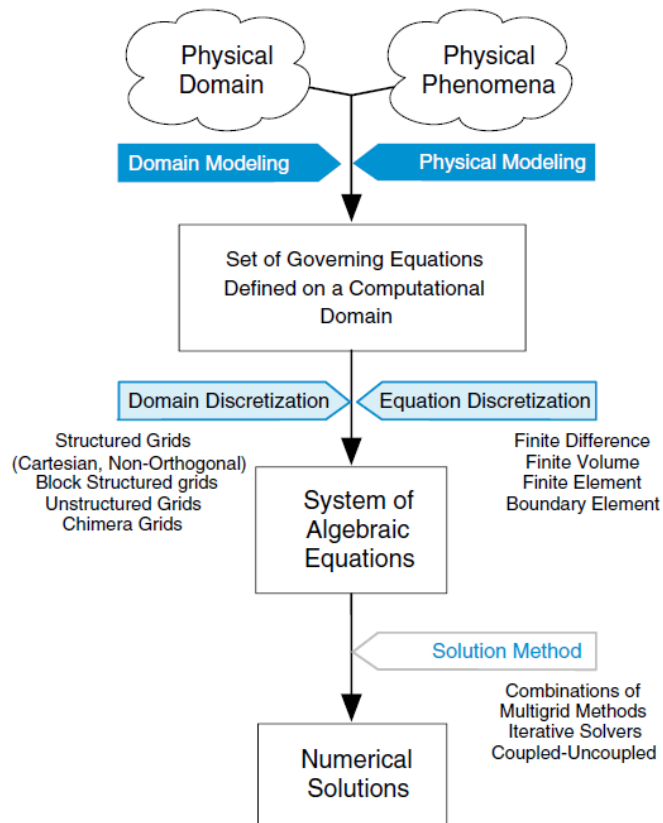


Figura 8. Processo di discretizzazione del problema [11].

## 4.1 Mesh di Calcolo

Il passo successivo per risolvere un problema descritto da un numero finito di informazioni è confinare il problema all'interno di uno spazio finito che prende il nome di **dominio di calcolo**. Il dominio è il solo luogo ove è definito ed esiste il problema che si vuole risolvere. La definizione del dominio di calcolo varia in funzione al caso da analizzare, i parametri che lo stabiliscono sono strettamente legati alle caratteristiche del tipo di problema da analizzare. Generalmente le dimensioni del dominio e la forma geometrica devono essere tali da non compromettere o modificare la soluzione che viene fornita.

Gli effetti di disturbo causati dai confini del dominio, per esempio, devono essere annullati il più possibile e le condizioni al contorno devono rappresentare la realtà dei casi senza influenzare la soluzione.

Anche la discretizzazione del dominio varia da caso a caso; ma le linee guida da seguire sono unificate e conformi per tutti i casi. La **mesh** è il concetto per discretizzare lo spazio. Lo scopo di una mesh è quello di trasformare lo spazio continuo in uno spazio finito discretizzato, composto da elementi di varie forme geometriche.

La conoscenza del dominio è determinata dall'insieme di elementi che prendono il nome di **celle**, che definiscono la mesh.

La soluzione numerica del sistema di equazioni differenziali alle derivate parziali si ottiene sostituendo alla soluzione esatta continua delle equazioni la soluzione numerica, perché sono valori numerici, calcolata nel punto caratteristico di ogni cella, spesso il baricentro.

Si trasforma così il sistema di equazioni, ottenendo un problema non più governato da equazioni differenziali ma da equazioni algebriche, da cui si ricavano le soluzioni puntuali associate ad ogni cella; il concetto è che risolta la soluzione per la singola cella, si passa alla cella successiva, considerando come nuovi valori di ingresso le soluzioni ottenute nella cella precedente.

Viene naturale pensare che la forma e la composizione delle celle influenzi la soluzione cercata.

In particolare, per ridurre il margine di errore determinato dalle approssimazioni, le celle devono essere di numero sufficiente per ottenere le informazioni adeguate in ogni punto del dominio e la loro forma e dimensioni devono essere coerenti con le caratteristiche del dominio e del problema da risolvere.

La mesh sarà, di fatto, composta da un insieme di elementi definiti da vertici e delimitate da facce.

Nella composizione della mesh, non devono risultare elementi sovrapposti e le celle devono riempire completamente il dominio di calcolo definito in precedenza.

La forma geometrica delle celle può essere di svariate forme, il suo scopo principale è quello di modellare al meglio gli elementi del dominio, ma la scelta è anche fatta in base al tipo di problema da analizzare.

Le celle possono essere definite in termini di punti che ne delimitano i vertici oppure in termini di facce che le caratterizzano.

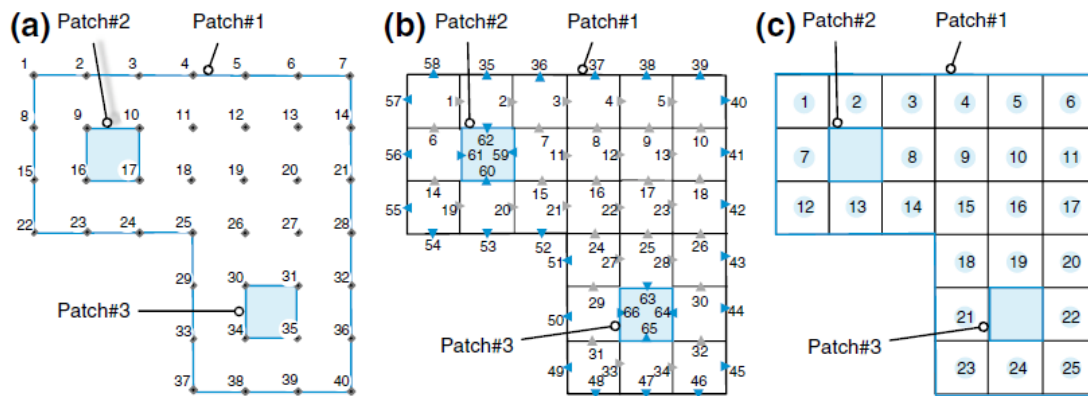


Figura 9. (a) mesh definita da vertici, (b) mesh definita da facce, (c) mesh definita da elementi [11].

Esistono varie **tipologie di mesh** che si definiscono osservando alcuni parametri caratterizzanti le celle che la compongono:

- Mesh bidimensionale, mesh tridimensionale;
- Mesh strutturata, mesh non strutturata, mesh ibrida;
- Tipi di elementi che la compongono (triangoli, poligoni, esaedri, ecc.).

La *Mesh strutturata* è la tipologia più semplice dal punto di vista teorico, la sua definizione è simile a quella di una griglia cartesiana. Può essere composta da elementi ortogonali oppure non ortogonali. Il grande vantaggio è che può essere descritta tramite una **struttura**.

Questo permette di classificare con numeri i vertici degli elementi che la compongono in modo ordinato e consecutivo, riuscendo a racchiuderla, nelle sue informazioni (coordinate dello spazio) in un vettore.

Una mesh strutturata da elementi bidimensionali è possibile rappresentarla all'interno di una matrice bidimensionale, dove ogni punto della mesh è riportato in modo univoco e si ha subito l'informazione di tutti gli elementi ad esso adiacenti.

Questo algoritmo semplifica notevolmente l'implementazione numerica, infatti la matrice del sistema di equazioni algebriche che ne scaturisce ha una struttura regolare, che può essere sfruttata per ottenere una semplice risoluzione.



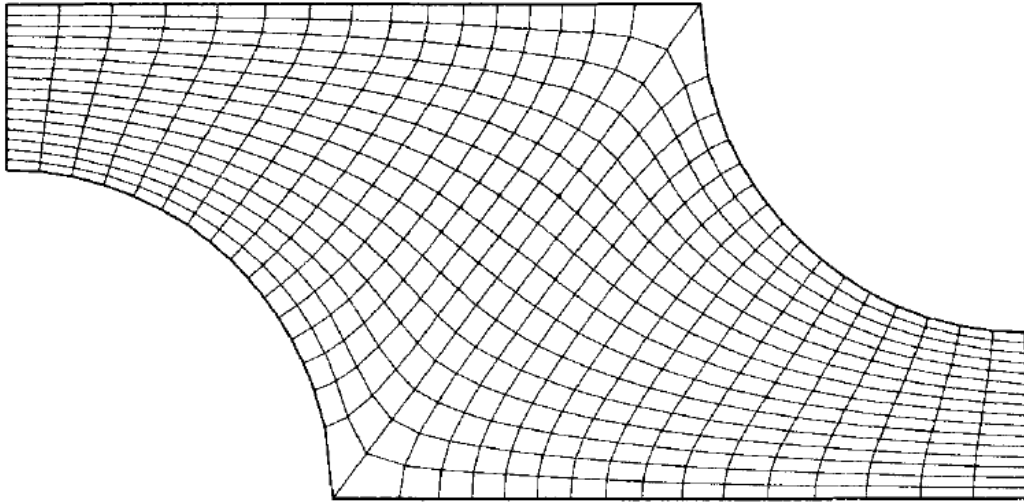


Figura 10. Mesh strutturata 2D composta da elementi non ortogonali [12].

Lo svantaggio principale delle mesh strutturate è che possono essere utilizzate solo per domini geometricamente semplici, quindi di difficile applicazione per casi veri.

Inoltre, con questa tipologia di mesh non si possono raffinare precise zone del dominio. Se, per esempio, la soluzione cercata è concentrata intorno a un particolare elemento del dominio, si è costretti a raffinare la mesh a livello globale e questo comporta un grande onere computazionale. Per ovviare a questa problematica sono nate le *mesh multiblocco*. In questo caso, la mesh è costituita da blocchi che rappresentano dei sottodomini. Ogni sottodominio è descritto con una matrice. Questo permette di discretizzare al meglio il dominio, infittendo, dove richiesto, il singolo blocco piuttosto che l'intera mesh, lasciando un raffinamento più grossolano nelle zone lontane del dominio, dove la soluzione è sufficientemente invariante per raffinamento. La soluzione finale del singolo blocco farà da condizione iniziale ai blocchi adiacenti; si ottiene, in questo modo, un miglioramento della soluzione riducendo i tempi di calcolo necessari per la sua determinazione.

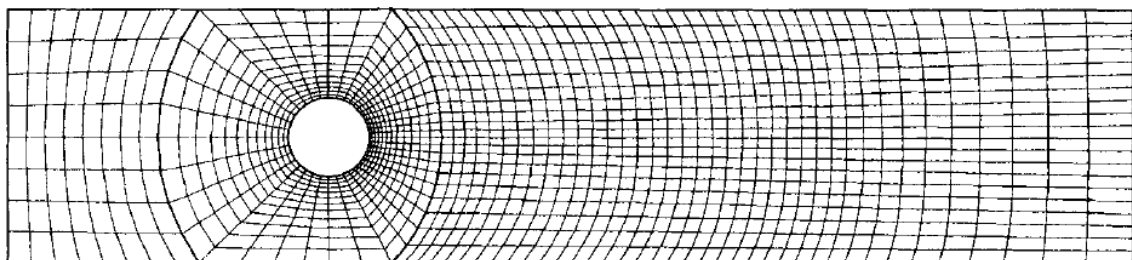


Figura 11. Mesh multiblocco strutturata 2D intorno a un foro [12].

Per riuscire a discretizzare anche domini con geometrie più complesse si è adottato il concetto di *Mesh non strutturata*. Sono mesh molto flessibili in grado di adattarsi ad ogni geometria.

Le celle possono avere qualsiasi forma e dimensione e non c'è limite al loro numero.

È necessario specificare quali sono gli elementi adiacenti, questo si traduce generando una matrice detta di *connettività*, che garantisce la continuità della mesh.

I raffinamenti possono essere eseguiti arbitrariamente non solo con le dimensioni delle celle ma anche implementando diverse forme geometriche.

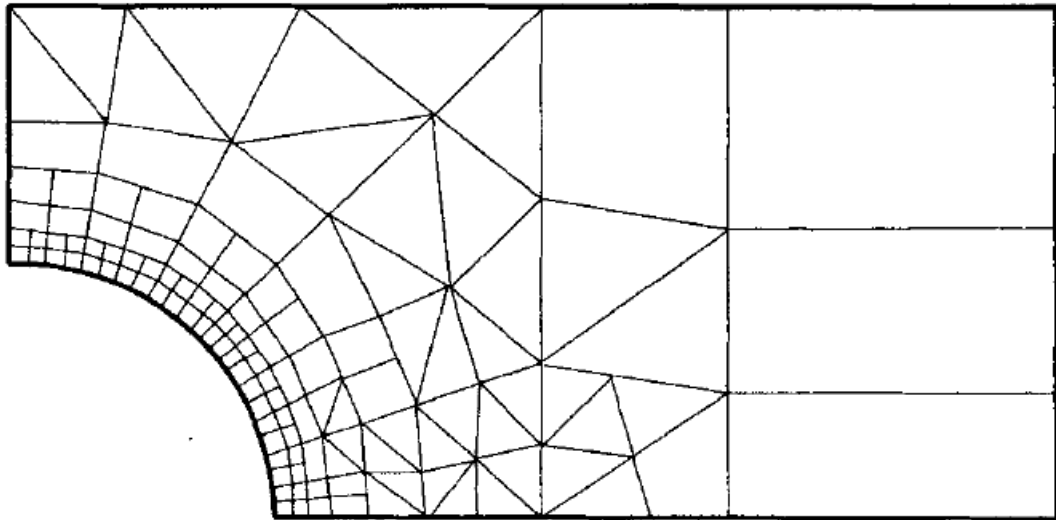


Figura 12. Esempio di mesh non strutturata [12]

Tuttavia, a causa della maggiore complessità nella discretizzazione del dominio, la matrice del sistema di equazioni algebriche non ha più una regolare struttura diagonale, questo porta ad un aumento dei tempi di generazione della mesh e di calcolo necessari per arrivare alla soluzione.

La soluzione adottata per questa tesi è stata quella di utilizzare due mesh non strutturate messe assieme, come si vedrà in seguito.

La creazione e la scelta di una mesh sono passaggi chiave e delicati nell'ambito della risoluzione di un problema CFD, i valori concentrati in una singola cella fuori posto possono allontanare anche significativamente la soluzione calcolata da quella reale.

Vengono pertanto definiti alcuni **parametri fondamentali** unificati per valutare la qualità di una mesh:

- Ortogonalità;
- Consistenza;
- Stabilità;
- Convergenza;
- Limitatezza;
- Realizzabilità.

Una mesh di qualità è indice di una buona approssimazione della soluzione.

Con l'**ortogonalità** si valuta l'angolo normale tra due celle adiacenti, deve essere il minore possibile.

Se l'equazione algebrica tende all'equazione differenziale al tendere di  $\Delta X$  a 0, allora il problema è **consistente** e si può procedere con la determinazione della soluzione.

Se l'algoritmo utilizzato per cercare la soluzione numerica non amplifica le approssimazioni causate dalla discretizzazione, si ha una soluzione **stabile**.

Per avere una soluzione **convergente** al tendere di  $\Delta X$  a 0, la soluzione numerica deve tendere alla soluzione esatta.

La **limitatezza** e la **realizzabilità** rientrano invece in un discorso di analisi critica dei risultati. Una soluzione numerica, infatti, offre quasi sempre un risultato ed è compito dell'operatore stabilire se si tratta di un risultato sensato, e quindi utilizzabile, oppure affetto da errori.

Le mesh vengono generate attraverso degli algoritmi. Inizialmente da un algoritmo algebrico, che risolve determinate equazioni algebriche per generare la mesh. Successivamente si migliora la qualità della mesh attraverso un algoritmo differenziale, che risolve equazioni differenziali per costruire le celle della mesh.

I parametri standard della qualità della mesh sono utilizzati all'interno degli algoritmi differenziali per poterli ottimizzare e condurli a convergenza.

### **Discretizzazione delle equazioni.**

Esistono diverse procedure matematiche che effettuano la discretizzazione delle equazioni.

Il metodo migliore, associato a una discretizzazione del dominio fatta con una mesh ibrida,

è il *metodo ai volumi finiti*. Si può applicare ad ogni tipologia di mesh ed è basato sulla fisica del problema, è il metodo prevalentemente utilizzato nella CFD.

Questo modo di procedere utilizza la forma integrale delle equazioni di conservazione come punto di partenza.

Il dominio della soluzione viene suddiviso in un numero finito di volumi di controllo contigui, le celle.

Le equazioni di conservazione (bilancio, massa, energia, momento angolare) vengono quindi applicate ad ogni singola cella.

Ad esempio, prendendo l'equazione del trasporto scritta in forma integrale:

$$\int_S (\rho\phi V) \cdot n ds = \int_V \Gamma(\nabla\phi) dv + \int_V \phi dv$$

Si osserva che gli elementi da discretizzare sono gli integrali. Per esempio, trovandosi a risolvere un'espressione del tipo  $\int_S f ds$ , dove  $f$  è una funzione che rappresenta una grandezza qualsiasi valida in tutto il dominio di calcolo, si adotta la strategia illustrata qui sotto.

Se si considera una cella caratterizzata dal proprio volume, si applica dunque l'integrale alla cella:

$$\int_S f ds = \sum_K \int_{S_K} f ds_K$$

Si calcola l'integrale su ogni lato della cella, infatti  $K$  misura il numero dei lati della cella.

Si applica quindi il teorema della media ottenendo:

$$\int_{S_K} f ds_K = S \cdot f(c)$$

Si assume, infatti, che esista un punto in cui l'integrale è uguale all'area della cella moltiplicato per il valore della funzione in un determinato punto.

Il punto  $c$  non è noto, è da qui che deriva l'approssimazione.

Infatti, si assume come punto  $c$  il centro dell'area della cella. In caso di celle 3D si assume il *centroide* del volume della cella. Tutte le grandezze sono rapportate ai volumi delle celle su cui sono calcolate. Questo è il motivo per cui nella fase di generazione della mesh bisogna fare attenzione al rapporto tra il volume della cella attuale e quella adiacente più piccola. Ci si può trovare a volte nella condizione di avere due o più celle contigue caratterizzate da volumi molto diversi potenzialmente, questo può portare a seri errori di calcolo.

Assunto di avere celle di dimensioni simili le une alle altre, il calcolatore si trova a dover risolvere un sistema algebrico di questo tipo  $Ax = b$ . Dove  $A$  è la matrice dei termini noti,  $x$  il vettore delle incognite e  $b$  quello dei termini noti. Per procedere alla soluzione ci si può affidare sia a metodi diretti che a metodi iterativi.

Per i calcoli di nostro interesse ci si è basati su metodi iterativi, dovendo risolvere problemi non stazionari, quindi dipendenti dal tempo. Con un metodo iterativo si ipotizza una soluzione iniziale, successivamente si calcola un errore con diverse metodologie e sfruttando algoritmi di ottimizzazione si riduce il più possibile l'errore. Questo si fa per ogni intervallo di tempo  $\Delta t$ .

L'intervallo di tempo viene definito attraverso il *Courant number*. Questo numero fornisce il rapporto tra la velocità delle informazioni fisiche rispetto alle informazioni numeriche.

$$C = \frac{U\Delta t}{\Delta x}$$

Dove  $U$  è la velocità e  $\Delta x$  la discretizzazione dello spazio. Si può procedere in diversi modi, fissando  $C$  e ottenendo di conseguenza il valore di  $\Delta t$  oppure viceversa.

Si può notare che più  $C$  è piccolo e più si hanno informazioni per ogni cella, ma si allungano i tempi di calcolo. Generalmente si cerca di avere  $C$  minore di 1. L'aumento del valore oltre 1 corrisponde all'omissione di alcune celle nel calcolo delle informazioni.

## 5. Scopo della Tesi

Dopo aver illustrato alcuni principi della CFD e della meccanica dei fluidi, si illustrano, nel seguente paragrafo, i motivi e lo scopo di questa tesi.

Lo studio delle prestazioni idrodinamiche dei pod, in regime stazionario e in manovra, hanno visto un incremento piuttosto importante a partire dal XXI secolo, come è stato evidenziato in precedenza.

Ai fini di una corretta previsione del comportamento dei propulsori azimutali, l'utilizzo di prove sperimentali rimane la metodologia più corretta da un punto di vista dei risultati. Tuttavia, per i motivi elencati in precedenza, tali prove non possono essere effettuate così facilmente e, per questo, l'avvalersi degli strumenti cari alla CFD è diventato ormai imprescindibile.

Malgrado ciò, in letteratura, permane la mancanza di una procedura unificata e robusta in grado di approssimare e risolvere qualsiasi tipo di geometria e/o configurazione che interessi l'ambito dei propulsori azimutali.

Questa tesi, pertanto, attraverso un confronto con i dati sperimentali ottenuti da Heinke et al. (2004) [6], si prefigge lo scopo di analizzare le prestazioni di un elica in configurazione pod/azimutale in regime di flusso obliquo.

Per fare ciò, si è utilizzato il software STAR-CCM+ implementando, in ambiente CFD, la stessa geometria utilizzata per gli studi in vasca del 2004 effettuati in Germania.

Dopo aver effettuato un'analisi di convergenza per configurare la qualità della mesh, sono state fatte una serie di simulazioni variando i valori del coefficiente d'avanzo  $J$  ai diversi angoli di azimuth, in condizioni di rotazione del pod attorno all'asse  $Z$  stazionarie. Tutto ipotizzando un regime di rotazione dell'elica fissato e concorde con quello utilizzato per le prove in vasca i cui dati erano disponibili.

Per tutte le simulazioni sono state calcolate le risultanti, nelle tre componenti  $x$ ,  $y$  e  $z$  della forza, agenti su elica, gondola e supporto. Per quanto riguarda l'elica è stata anche calcolata la coppia e le forze agenti sulla singola pala.

Note le azioni, sono stati calcolati i coefficienti adimensionali al fine di creare un database strutturato utile per studi di manovrabilità eventualmente futuri.

Per testare la robustezza del modello e della mesh impiegata per il calcolo, è stata condotta un'analisi di convergenza a tre diversi angoli di rotazione del pod  $\psi$ :  $\{0^\circ; 45^\circ; 90^\circ\}$  per un unico valore del coefficiente d'avanzo  $J = 0.847$ , a un regime di rotazione dell'elica pari a 15 [rps]. Questo confrontando otto mesh diverse al variare della **base size**, ossia il parametro fondamentale per definire le dimensioni della mesh sul software utilizzato come si vedrà in seguito.

Le analisi sono state condotte per le configurazioni propulsive *Pull* e *Push* a diversi valori del coefficiente d'avanzo  $J$  e per il range di angoli di azimuth da  $0^\circ$  a  $360^\circ$  con un range di  $30^\circ$  tra angolo e angolo.

Infine, con lo scopo di definire una procedura più snella e meno onerosa dal punto di vista computazionale, sono state effettuate delle simulazioni considerando:

- La struttura completa del pod priva di elica. Questo per verificare quanto le forze agenti sulla struttura cambiano in base alla presenza o meno dell'elica funzionante;
- La struttura completa del pod con disco attuatore al posto dell'elica. Questo per vedere se è possibile costruire un modello più semplice e sostitutivo rispetto a quello completo con elica.

# Materiali e Metodi

Come detto in precedenza, lo scopo di questo elaborato è indagare le prestazioni di un propulsore azimutale, in regime di flusso obliquo, utilizzando il software CFD STAR-CCM+.

In particolare, l'obiettivo è simulare, nel modo più preciso possibile, l'analisi di Heinke del 2004. Per fare ciò, è utile definire in maniera più accurata la situazione con la quale si ha a che fare, soprattutto in termini di geometria e di fisica del problema.

Una volta fatto questo, nel corso del seguente capitolo, verrà illustrata la metodologia e i passi effettuati per realizzare le simulazioni numeriche realizzate per estrarre i dati.

Una volta terminato il confronto coi dati sperimentali, è stato implementato un modello con il disco attuatore al posto dell'elica per vedere quando e dove è possibile utilizzare un modello più semplice per studiare il comportamento del propulsore azimutale in ottica più progettuale.

## 1. Studio sperimentale di Heinke

Lo studio sperimentale di Heinke prevedeva l'analisi in configurazione *pull* e *push* di un sistema propulsivo composto dalla struttura completa del pod: piede, gondola, mozzo ed elica.

In particolare, i test sono stati effettuati considerando un'elica a quattro e cinque pale. Mediante un dinamometro *z-drive* e una bilancia a sei componenti sono state calcolate le forze e i momenti agenti sulla struttura completa e sull'elica. Questo al variare dell'angolo di rotazione del pod.

### 1.1 Geometria del problema

La struttura completa del pod, piede, gondola, mozzo ed eliche, è stata progettata allo SVA di Potsdam, ed entrambe costruite affinché, per un valore del coefficiente di coppia  $K_Q$  pari a 0.03489, sia disponibile un coefficiente d'avanzo prossimo a  $J = 0.85$ .



Le eliche devono poter essere disposte in configurazione *pull* e *push*, motivo per cui sono state costruite con un mozzo di forma cilindrica tale che  $d_h/D = 0.2568$  e le pale prive di angolo di rake, o angolo di abbattimento delle pale.

In Tabella 2,3 e 4 sono illustrati i dati principali dell'elica a quattro pale, del mozzo e della struttura portante del pod, costituita da gondola e piede.

<b>Modello di elica</b>		CP 1374
<b>Diametro elica</b>	D [m]	0.220
<b>Pitch ratio<sup>1</sup></b>	$P_{0.7}/D$ [-]	1.1447
<b>Pitch ratio<sup>2</sup></b>	$P_{ean}/D$ [-]	1.1138
<b>Area espansa/area disco</b>	$A_E/A_0$ [-]	0.81055
<b>Lunghezza della corda</b>	$C_{0.7}$ [m]	0.10025
<b>Rapporto mozzo su diametro</b>	$d_h/D$ [-]	0.2568
<b>Skew angle</b>	$\Theta_{eff}$ [°]	24.2188
<b>Numero di pale</b>	Z [-]	4
<b>Senso di rotazione</b>		Elica destrorsa

Tabella 2. Dati principali dell'elica.

<b>Rapporto lunghezza del mozzo</b>	$l_h/D$ [-]	0.3193
<b>Rapporto diametro del mozzo (pull test)</b>	$d_h/D$ [-]	0.3636
<b>Rapporto diametro del mozzo a prua</b>	$d_{hf}/D$ [-]	0.2648
<b>Rapporto diametro del mozzo a poppa</b>	$d_{ha}/D$ [-]	0.4102
<b>Rapporto diametro del mozzo (push test)</b>	$d_h/D$ [-]	0.3530
<b>Rapporto diametro del mozzo a prua</b>	$d_{hf}/D$ [-]	0.4106
<b>Rapporto diametro del mozzo a poppa</b>	$d_{ha}/D$ [-]	0.2899

Tabella 3. Dati principali del mozzo rapportati a D.

La geometria della struttura portante del pod è la seguente: il piede è un profilo NACA e la gondola è un corpo assial-simmetrico con diametro massimo a metà lunghezza.

L'asse di rotazione del pod, che determina l'angolo di azimuth, passa a metà di gondola e piede, secondo lunghezza. La distanza tra l'asse di azimuth e il piano contenente l'elica è uguale in configurazione push e pull.

<b>Configurazione propulsiva</b>			<b>Pull</b>	<b>Push</b>
<b>Rapporto lunghezza gondola/D</b>	$l_G/D$	[-]	1.7557	1.7977
<b>Rapporto lunghezza totale pod/D</b>	$l/D$	[-]	2.2159	2.2159
<b>Rapporto diametro della gondola</b>	$d_G/D$	[-]	0.5000	0.5000
<b>Rapporto distanze piano elica-asse di rotazione</b>	$b/D$	[-]	0.8125	0.8352
<b>Rapporto lunghezza corda del piede/D</b>	$C_{0.7}/D$	[-]	1.0247	1.0247
<b>Rapporto altezza del piede/D</b>	$h/D$	[-]	0.4545	0.4545

Tabella 4. Dati principali della struttura portante, pod più gondola.

In Figura 13 e 14 si illustrano i parametri geometrici nelle due configurazioni propulsive, *pull* e *push*.

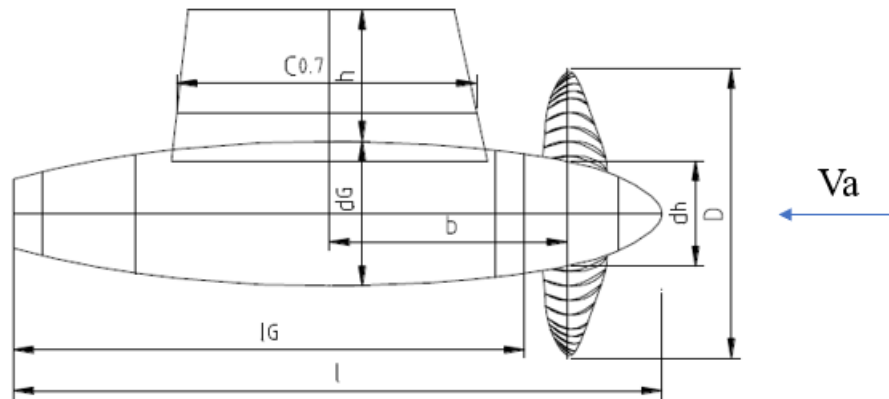


Figura 13. Parametri geometrici in configurazione *pull*.

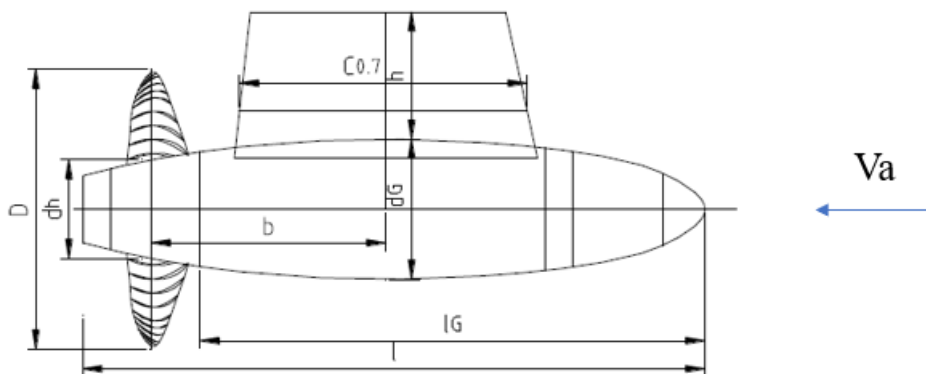


Figura 14. Parametri geometrici in configurazione *push*.

## 1.2 Dispositivi di misurazione

Al fine di misurare le forze e i momenti agenti sulla struttura, durante le prove, sono stati costruiti:

- Un dinamometro *z-drive* Z600/4/1 - il cui compito è misurare la spinta  $T_P$  e la coppia  $Q_P$  esercitate dall'elica e allo stesso tempo le forze nella direzione verticale e orizzontale  $F_{YP}$  e  $F_{ZP}$ , mediante una gabbia con cuscinetti appositi. Le grandezze misurate sono estratte in un sistema di riferimento ruotato come il pod, dello stesso angolo di azimuth.

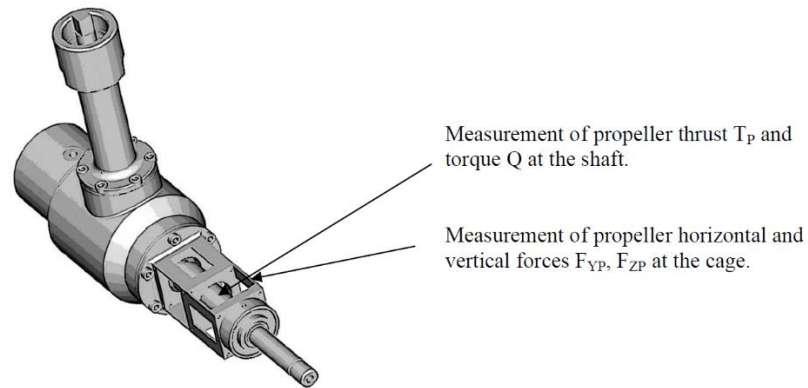


Figura 15. Dinamometro *z-drive* (Z600/4/1).

- La bilancia a sei componenti R200 è stata costruita apposta per i test in acqua tranquilla ai differenti angoli di rotazione. La bilancia è costituita da una *rotary table*, un dispositivo meccanico dove la rotazione continua dell'asse di input si converte in una rotazione intermittente del disco di output.

L'elica è infatti alimentata da un motore elettrico installato sopra la *rotary table*.

La bilancia misura le forze e i momenti del sistema di propulsione in un sistema di riferimento fisso con la nave, quindi non ruotato dell'angolo di azimuth.

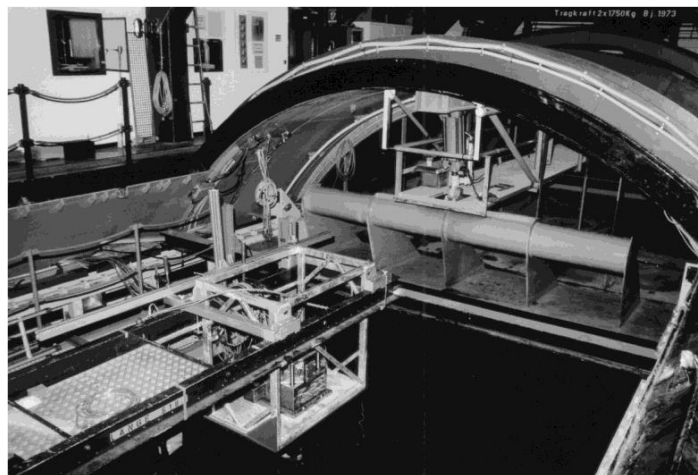


Figura 16. Tunnel di cavitazione UT2 con la bilancia R200 utilizzato per le prove.

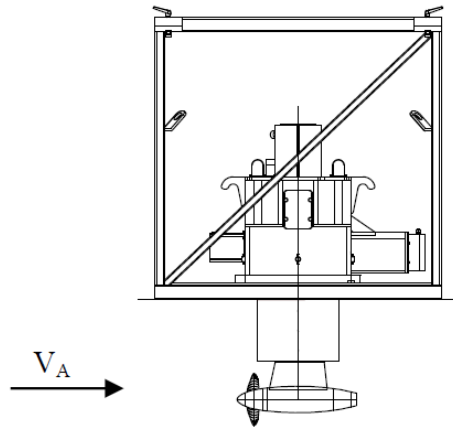


Figura 17. Configurazione dei test per caso *pull*.

In Figura 18 e 19 sono definite le forze e i momenti e i sistemi di coordinate.

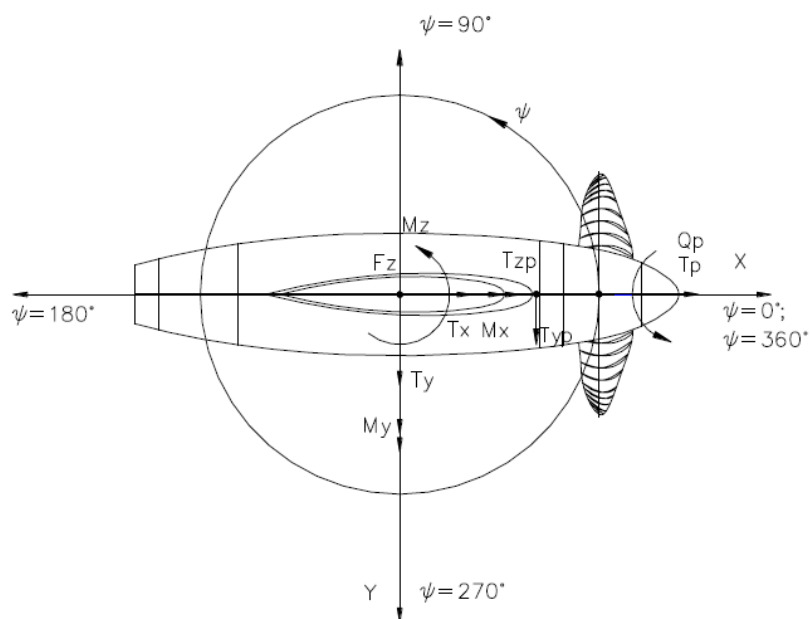


Figura 18. Sistemi di riferimento e grandezze misurate in configurazione *pull*.

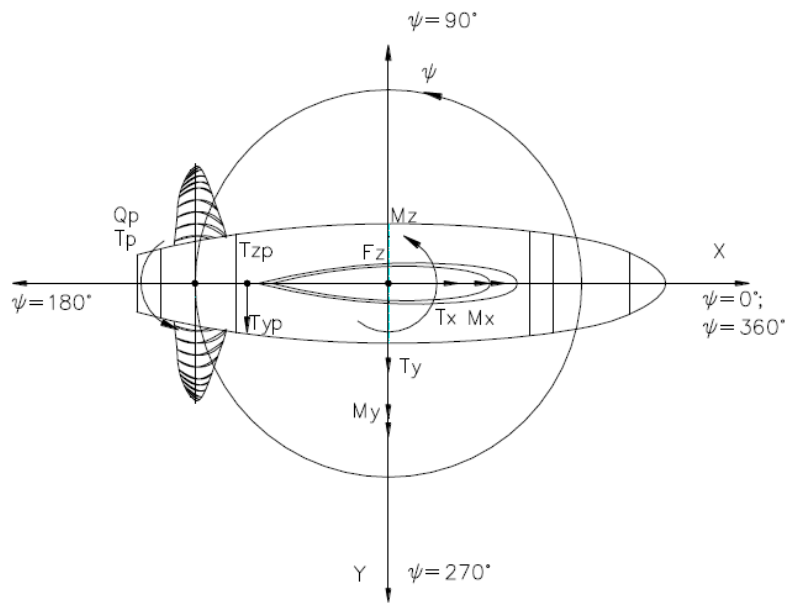


Figura 19. Sistemi di riferimento e grandezze misurate in configurazione *push*.

Nella figura sottostante si evidenzia la differenza tra i due sistemi di riferimento in una configurazione ruotata del pod pari a  $\psi = 60^\circ$  in configurazione *pull*. Dove  $\psi$  è l'angolo di **azimuth** secondo cui viene ruotato il pod.

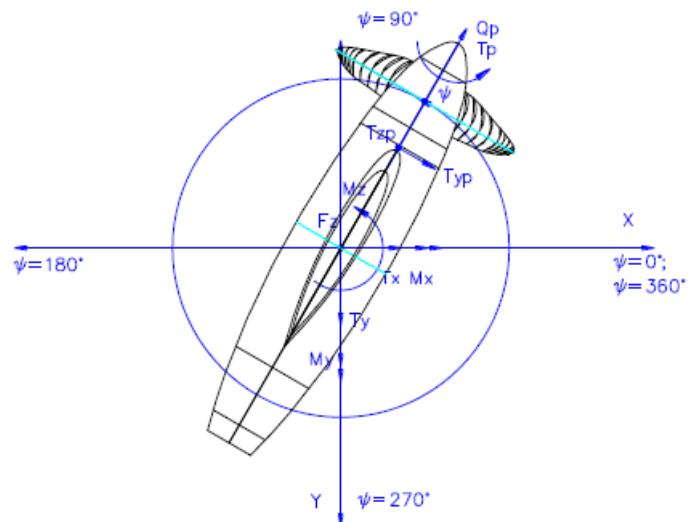


Figura 20. Sistemi di riferimento in configurazione *pull* per  $\psi = 60^\circ$ .

È bene far notare che i sistemi di riferimento definiti negli esperimenti non sono concordi con la regola della mano destra, ossia i sistemi di assi non costituiscono delle terne destrorse. L'asse y è infatti orientato in senso opposto, mentre gli assi x e z sono normalmente definiti.

### 1.3 Coefficienti misurati

Durante le prove, come è stato detto, sono state misurate le forze e i momenti agenti sulla struttura e sull'elica.

È opportuno far notare che: sebbene, ai fini di una corretta valutazione delle prestazioni in manovra, sia molto importante conoscere le forze espresse dall'elica, è di grande rilevanza conoscere i momenti e le forze agenti sulla struttura. Questo per una corretta progettazione e dimensionamento, da un punto di vista strutturale, dei meccanismi destinati alla rotazione del pod.

Ottenuti i valori delle grandezze, essi poi sono stati adimensionalizzati per un utilizzo più fruibile. I coefficienti calcolati sono dunque i seguenti:

- Coefficiente d'avanzo  $J = \frac{V}{n \cdot D}$
  - Coefficiente di spinta dell'elica  $K_{TP} = \frac{T_p}{\rho n^2 D^4}$
  - Coefficiente di spinta della struttura portante  $K_{TPOD} = \frac{T_p \cos(\psi) - T_x}{\rho n^2 D^4}$
  - Coefficiente della forza longitudinale  $K_{TX} = \frac{T_x}{\rho n^2 D^4}$
  - Coefficiente della forza trasversale  $K_{TY} = \frac{T_y}{\rho n^2 D^4}$
  - Coefficiente della forza verticale  $K_{TZ} = \frac{T_z}{\rho n^2 D^4}$
  - Coefficiente della forza risultante  $K_{TR} = \frac{T_R}{\rho n^2 D^4}$
- dove  $T_R = \sqrt{T_x^2 + T_y^2}$
- Coefficiente di coppia dell'elica  $K_{QP} = \frac{Q}{\rho n^2 D^5}$
  - Efficienza dell'elica  $\eta_0 = \frac{J}{2\pi} \frac{K_{TP}}{K_Q}$
  - Efficienza in direzione x  $\eta_X = \frac{J}{2\pi} \frac{K_{TX}}{K_Q}$

- Coefficiente del momento attorno all'asse x  $K_{MX} = \frac{M_X}{\rho n^2 D^5}$
- Coefficiente del momento attorno all'asse y  $K_{MY} = \frac{M_Y}{\rho n^2 D^5}$
- Coefficiente del momento attorno all'asse z  $K_{MZ} = \frac{M_Z}{\rho n^2 D^5}$
- Coefficiente della forza trasversale dell'elica  $K_{FYP} = \frac{F_{YP}}{T_p}$
- Coefficiente della forza verticale dell'elica  $K_{FZP} = \frac{F_{ZP}}{T_p}$

È importante ribadire che i coefficienti delle azioni riferite all'elica ( $K_{TP}$ ,  $K_{QP}$ ,  $K_{FYP}$ ,  $K_{FZP}$  e  $\eta_0$ ) sono relativi al sistema di riferimento ruotato, mentre i coefficienti delle azioni agenti sul pod sono valutati nel sistema di riferimento non ruotato.

## 1.4 Risultati delle prove

Come detto in precedenza, le prove sono state effettuate in configurazione *pull* e *push*, ai diversi angoli di azimuth da  $0^\circ$  a  $360^\circ$ , a diversi valori del coefficiente d'avanzo  $J$  da 0 a 1.20. Questo per un numero di giri dell'elica, destrorsa, sempre costante, pari a  $n = 10 [s^{-1}]$  o  $15 [s^{-1}]$ .

Sono state poi effettuate delle prove a  $0^\circ$  per la sola elica e per la struttura completa del pod. A titolo di esempio sono riportati alcuni grafici presentati nella pubblicazione.

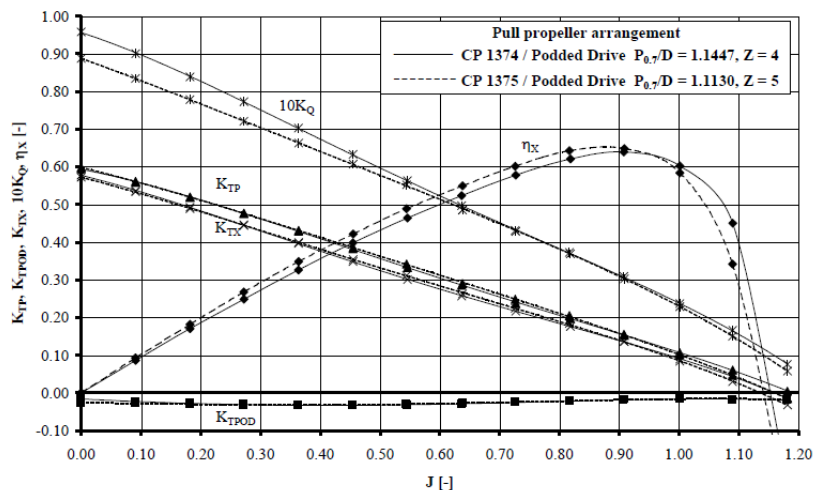


Figura 21. Caratteristiche Open water del pod con elica in configurazione *pull* e *push* a  $\psi = 0^\circ$ .

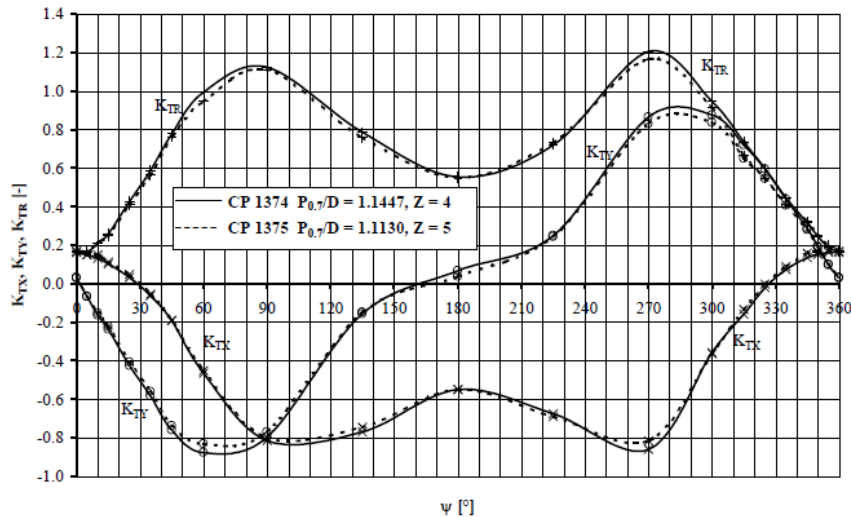


Figura 22. Coefficienti delle forze longitudinali e trasversali agenti sul pod ai diversi angoli di azimuth per una configurazione *pull* a  $J = 0.847$ .

Non vengono qui riproposti i risultati delle prove ad elica bloccata in configurazione *pull* e *push*. Questo al fine di ottenere alcune caratteristiche chiave necessarie per simulare manovre di *crash stop*.

Inoltre, alcune analisi sperimentali sulla cavitazione hanno evidenziato come, a basso numero di giri dell'elica, la cavitazione sia influente e ciò risulta verosimile con un reale comportamento della propulsione ad angoli di azimuth diversi da  $0^\circ$ , ossia in manovra. In quanto in tali condizioni, a bassi numeri di Reynolds dell'elica, è più difficile che si abbia l'insorgenza di fenomeni cavitativi

Questi ultimi due aspetti non sono stati presi in considerazione per l'analisi CFD effettuata per le simulazioni che caratterizzano questo elaborato.

In relazione all'estrazione dei dati necessari per il confronto che si vuole realizzare, va evidenziato inoltre come i risultati in forma tabulare vengano forniti solo per alcuni valori dell'angolo di azimuth e per la sola configurazione *pull* ai diversi valori di  $J$ .

Motivo per cui, per il caso *push* è stata effettuata una breve analisi a un solo valore del coefficiente d'avanzo  $J$  pari a 0.847 ai diversi angoli di azimuth, compatibilmente con i valori disponibili.



## 2. Implementazione su STAR-CCM+

Una volta descritto in modo accurato l'esperimento che si vuole replicare, in termini di fisica e di geometria, è possibile procedere con l'implementazione del problema sul software STAR-CCM+.

STAR-CCM+, acronimo di *Simulation of Turbulent flow in Arbitrary Regions - Computational Continuum Mechanics*, è un software commerciale per la fluidodinamica computazionale prodotto da Siemens, di largo utilizzo in molti settori dell'industria e del mondo accademico, basato sul metodo ai volumi finiti (tetraedri, celle trimmate, poliedri). Per mezzo di questo software è stata realizzata la nostra campagna di simulazioni volta a ricreare le stesse condizioni dello studio del 2004 di Heinke.

La condizione che deve essere simulata è quella di un pod, con elica sia in configurazione *pull* che *push*, investito da un flusso uniforme d'acqua e con elica in rotazione. Ogni simulazione è stata effettuata ad angoli di azimuth diversi, senza considerare la condizione dinamica di rotazione del pod ma focalizzandosi solo sulle prestazioni statiche. Questo in quanto il comportamento dinamico in manovra del pod non è obiettivo di indagine di questa tesi, per via della complessità del modello e del tempo necessario ad avere un riscontro strutturato.

Per fare ciò è stato necessario seguire una serie di passi, che verranno illustrati nel seguito e che sono state la base per tutte le simulazioni condotte in seguito.

### 2.1 Geometria e i sistemi di riferimento

#### 2.1.1 Geometria

Assieme alla pubblicazione, è stata fornita anche la **geometria del pod** in formato CAD, utilizzata per costruire il profilo utilizzato negli esperimenti in vasca.

Il primo step eseguito, dunque, è stato quello di riparare la geometria in esame, avvalendosi del software commerciale Rhinoceros.

Essa presentava alcune irregolarità e “buchi” che necessitavano di essere riparati, in caso contrario la mesh, generata su STAR-CCM+, che si sarebbe appoggiata sopra avrebbe portato a risultati completamente sbagliati e ad errori di calcolo.

Una volta riparata adeguatamente la geometria, è stato possibile esportarla in formato *IGES* e caricarla sul software STAR-CCM+.

I file *IGES* sono file CAD vettoriali che descrivono le superfici tramite le loro primitive, questo permette di avere una rappresentazione delle superfici tramite le formule analitiche che le hanno generate. In questo modo risulta, quindi, possibile discretizzare a piacere le superfici partendo sempre dalle loro forme analitiche. STAR-CCM+ importa il file interpretando le superfici con una tassellazione iniziale composta da figure geometriche semplici, generalmente triangoli. Per tolleranze numeriche o per l’interpretazione delle informazioni in maniera differente tra un software e l’altro, può accadere che due linee o due superfici adiacenti, che nel CAD di partenza sono unite, si separino oppure combacino.

Prima di procedere si controlla quindi che il file dopo l’interpretazione del programma non abbia discontinuità o errori, eliminandoli dove presenti, per avere la certezza che il dominio di calcolo sia completamente un **dominio chiuso**. Avere un dominio aperto porta ad errori nella creazione della mesh e a cascata sulla soluzione che si vuole ottenere.

In Fig. 23 e 24 si può vedere la geometria CAD del pod in configurazione *pull*; su STAR-CCM+ le forme geometriche che si definiscono prendono il nome di *parts*.

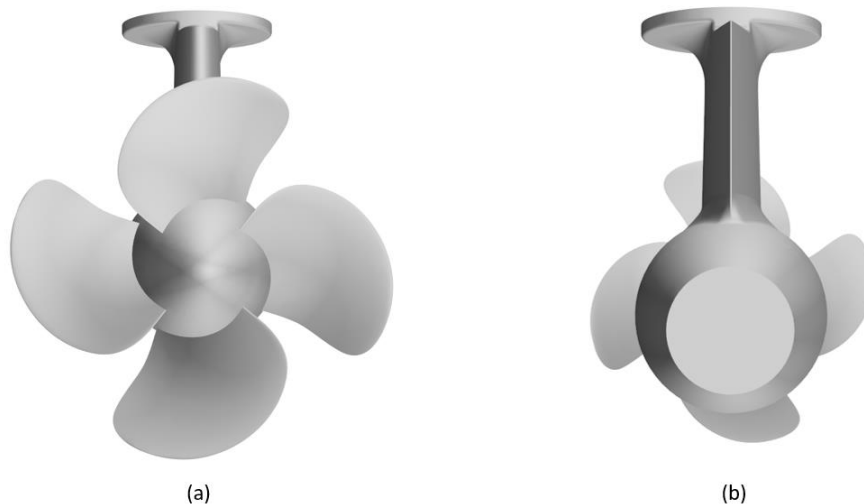


Figura 23. Pod in configurazione *pull*, (a) vista prodiera, (b) vista poppiera.

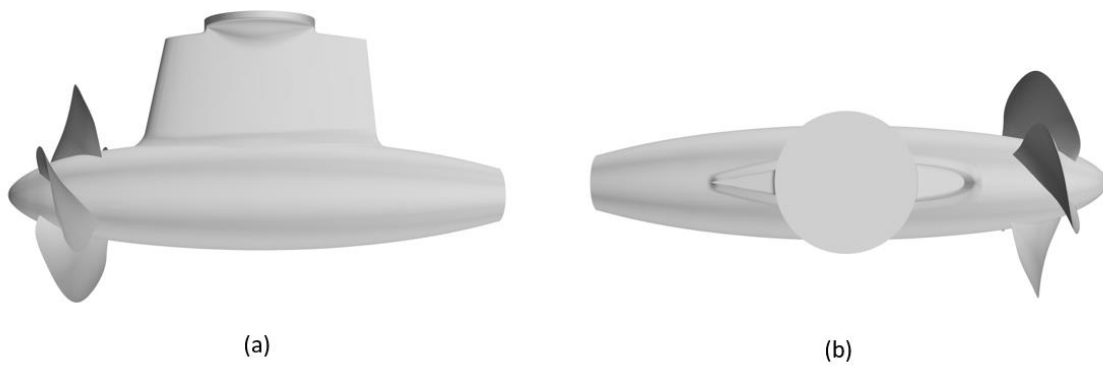


Figura 24. Pod in configurazione *pull*, (a) vista longitudinale, (b) vista in pianta.

Per comprendere al meglio i fenomeni idrodinamici si è suddivisa la geometria in più parti denominate *patches*. La suddivisione permetterà infatti poi di calcolare le forze agenti su determinate porzioni o su più di esse combinate assieme.

È mediante questo passaggio che diventa così possibile, in fase di *post-processing*, di calcolare, indipendentemente le une dalle altre, le forze agenti sulla singola pala, sull'elica e sul supporto del pod (piede e gondola). Questo è possibile perché ogni *patch* viene gestita in maniera indipendente.

In particolare, le *patches* con cui è stata divisa la geometria sono le seguenti:

- **Gondola**, che costituisce il corpo cilindrico su cui si appoggiano le pale e che comprende anche il mozzo dell'elica;
- **Piede**, che costituisce il supporto mediante il quale il pod si collega alla carena;
- **Pale**, numerate e suddivise da 1 a 4 e comprensive del loro rispettivo *trailing edge*, il lembo d'uscita del flusso.

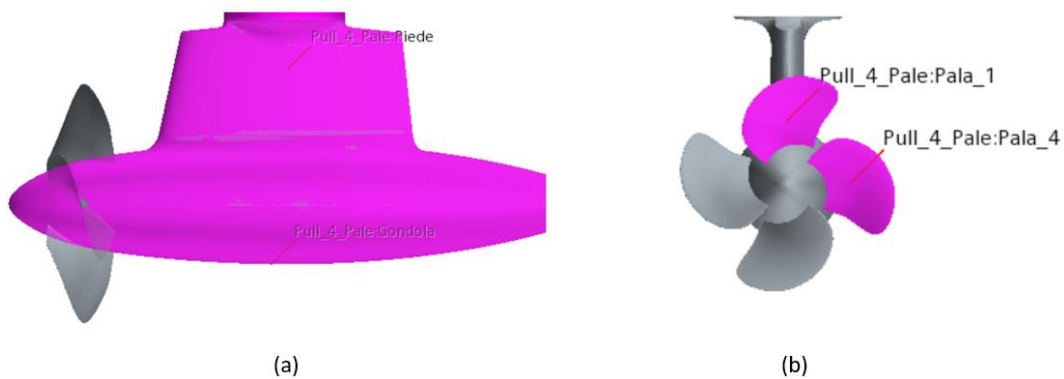


Figura 25. Alcune delle *Patches* con cui è stata divisa la geometria. (a) Gondola e Piede, (b) due delle quattro pale.

### 2.1.2 Sistemi di riferimento

Dopo aver definito la geometria che farà da base per i nostri calcoli il successivo passo è definire i **sistemi di riferimento** con i quali si opera e rispetto ai quali verranno ricavate le azioni agenti.

I sistemi di riferimento impostati sono due, questo al fine di estrarre risultati il più possibile confrontabili con l'esperienza di Heinke.

- **Sistema di riferimento solidale fisso**, è quello solidale alla nave e rispetto al quale sono state misurate le azioni per mezzo della bilancia a sei componenti negli esperimenti.  
Nella nostra simulazione è stato disposto a metà lunghezza di Gondola e Piede, coincidente con quello degli esperimenti;
- **Sistema di riferimento ruotato**, è quello che segue la rotazione del pod ai diversi angoli di azimuth. È centrato come il sistema di riferimento fisso, posto a metà lunghezza di Gondola e Piede.

I risultati, in termini di forze e momenti agenti sull'intera struttura e sull'elica, sono stati valutati in entrambi i sistemi di riferimento. Questo per agevolare alcune operazioni e per un confronto più accurato.



Figura 26. Sistemi di riferimento, (a) fisso e (b) ruotato, per un angolo di azimuth pari a  $45^\circ$ .

### 2.1.3 Dominio di calcolo

Per realizzare la simulazione e ricreare le condizioni degli esperimenti, è necessario definire il dominio dove verrà risolto il campo di moto fluido. Prima da un punto di vista geometrico e poi da un punto di vista più “fisico”.

L’idea seguita in questa tesi è quella di definire due domini che verranno poi associati a due mesh diverse.

Prima di definire i domini veri e propri è necessario creare due **volumi geometrici**:

- **Blocco esterno**, è il parallelepipedo che contiene tutto il campo di moto da analizzare. Deve avere dimensioni adeguate in modo da evitare effetti di interferenza fluido-parete-oggetto della simulazione, in questo caso il pod.  
In tutte le simulazioni si è considerato un parallelepipedo di lunghezza pari a 2.15 m, larghezza pari a 2.20 m e altezza pari a 1.26 m;
- **Cilindro interno**, è la porzione di spazio destinata a contenere l’elica e il suo mozzo. È stato definito come un cilindro di raggio pari a 0.12 m, poco più grande di quello dell’elica, e lungo 0.14 m. Questa soluzione viene adottata per realizzare il moto rigido dell’elica attorno al suo asse; pertanto, la forma cilindrica è quella giusta.

Essendo queste porzioni delle geometrie che dovranno poi assumere un connotato fisico, come fatto per il pod, è necessario suddividere anche le superfici di questi volumi in *patches*. In questo modo sarà possibile calcolare le forze e le grandezze agenti su queste superfici seguendo lo stesso discorso applicato per il pod.

Una volta create queste due porzioni di spazio, che di fatto si intersecano con la geometria CAD del pod importata precedentemente, ad esse è stata sottratta, in maniera ordinata, quest'ultima. Mediante questa operazione, che consiste, di fatto, in una **sottrazione booleana** di porzioni di spazio, si ha a disposizione un **dominio complessivo** composto da due sottodomini:

- **Dominio Esterno** - costituito dalla porzione di spazio definita dal blocco esterno a cui è stato sottratto il cilindro interno più la struttura completa del pod;
- **Dominio Interno** – costituito dalla porzione di cilindro interno a cui è stata sottratta la struttura completa del pod comprensiva anche delle pale.

Le porzioni geometriche che si ottengono da quest'operazione sono suddivise in *patches* seguendo la suddivisione fatta per le geometrie che hanno preso parte alla sottrazione. È da notare che il dominio complessivo che si compone di queste due regioni geometriche, non ha ancora un connotato fisico, ma definisce la struttura geometrica su cui si poggerà la mesh.

#### **2.1.4 Definizione delle *Region* e condizioni al contorno**

Una volta definito geometricamente il problema, è opportuno caratterizzare fisicamente i volumi e le superfici del dominio di calcolo. Questo step è necessario in quanto le equazioni di Navier-Stokes, data la loro natura differenziale, per essere risolte, anche numericamente, necessitano di condizioni al contorno. Di fatto, su STAR-CCM+, si opera particolarizzando le porzioni del dominio e le loro superfici (quelle di entrambi i sottodomini) definendo delle **region**.

Essendo due le porzioni di spazio geometriche definite, le *region* con cui suddividiamo il dominio di calcolo sono:

- **Region Esterna** – ad essa è stato assegnato il dominio esterno, con tutte le sue *patches*. Questo passo è fondamentale, in quanto ad esse è così possibile assegnare delle specifiche condizioni al contorno;
- **Region Interna** – ad essa è stato assegnato il dominio interno, anch'esso suddiviso in *patches*.

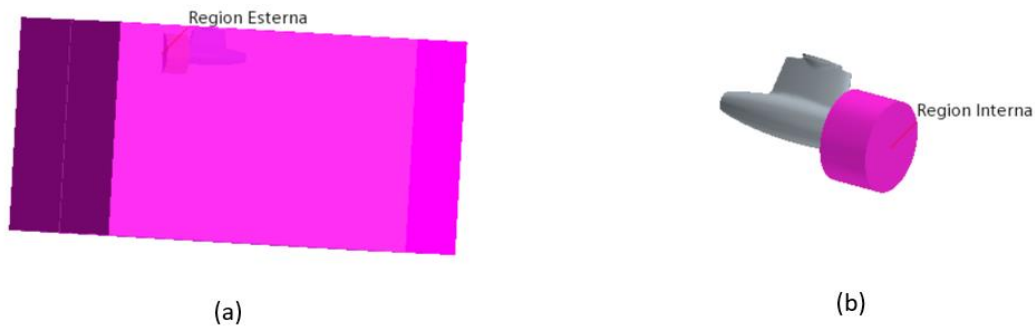


Figura 27. Region Esterna (a) e Region Interna (b).

Una volta associate le *parts* alle determinate *region*, si può procedere con il definire le **boundaries**, le condizioni al contorno che caratterizzano le superfici.

Il numero di condizioni al contorno complessive è strettamente collegato al numero di *patches* con cui è stata suddivisa la geometria.

Di fatto, per quanto riguarda la **Region Esterna**, le **boundaries** sono le seguenti:

- **Inlet**, a cui è stata assegnata la *patch* di blocco esterno dalla quale entra il flusso che investe il pod. È la superficie perpendicolare all'asse x e alla direzione del flusso, ad essa è stata assegnata la connotazione di “velocity inlet”;
- **Outlet**, a cui è stata assegnata la *patch* di blocco esterno laterale rimanente, dalla quale esce il flusso. Quindi è la superficie composta dai fianchi e dalla parte poppiera del blocco, ad essa è stata assegnata la connotazione di “pressure outlet”;
- **Sopra e sotto**, ad esse sono state assegnate le *patch* di blocco esterno che costituiscono il pelo libero e il fondo del dominio. Ad esse è stata assegnata la connotazione di “simmetry plane”, in questo modo si assume che tali superfici

possano essere attraversate dal flusso e che non influiscano il campo di moto agente sul pod;

- **Cilindro esterno**, ad essa è assegnata la *patch* di dominio esterno che corrisponde alla superficie cilindrica che avvolge il mozzo e l'elica. Va notato che tale superficie è duplice, in quanto, per definizione del problema e per via delle sottrazioni booleane effettuate, ne esistono due: una dovuta al blocco esterno creato e una dovuta al cilindro interno creato.

Tale boundary si caratterizza come “simmetry plane” in fase di creazione della mesh, come si vedrà in seguito è stata trasformata successivamente in un'interfaccia “in place”, che permette lo “scorrimento” della superficie interna su quella esterna durante il moto e lo scambio di dati tra i due domini, fisso e rotante;

- **Pod esterno**, ad essa è stata assegnata la *patch* di blocco esterno che corrisponde alla superficie del pod, a meno del mozzo e delle pale dell'elica che sono nella region interna.

Tale superficie viene caratterizzata come “wall” e su di essa verranno calcolate parte delle forze agenti sul pod.

Per quanto riguarda la **Region Interna** le *boundaries* sono invece:

- **Cilindro interno**, ad essa è stata assegnata la *patch* di dominio interno che corrisponde alla superficie cilindrica che avvolge il mozzo e l'elica.

Tale superficie si caratterizza come “simmetry plane”, analogamente a quella speculare definita per la *Region Esterna*, in quanto devono possedere le stesse caratteristiche.

Come fatto per la boundary *Cilindro Esterno*, essa sarà poi trasformata in un'interfaccia di tipo “in place”, per permettere lo scorrimento della superficie interna su quella esterna durante il moto e lo scambio di dati tra i due domini, fisso e rotante;

- **Gondola**, ad essa è stata assegnata la *patch* di dominio interno che corrisponde alla superficie del mozzo, tagliato mediante l'operazione booleana che ha coinvolto il cilindro interno e la superficie del pod.

È stata caratterizzata, come tutte le superfici che definiscono il pod, come di tipo “wall”;



- **Pale e Pala riferimento.** Le *patches* che costituiscono le pale dell'elica, dove verranno calcolate la spinta, la coppia e le forze in direzione trasversale e verticale ( $F_{YP}$  e  $F_{ZP}$ ), sono state divise in due boundary separate di tipo "wall" anch'esse. L'idea di avere una porzione dedicata esclusivamente a una singola pala è utile, ai fini del calcolo, per poter ottenere, in maniera separata, le azioni agenti su di essa.

Terminata questa operazione, le superfici che caratterizzano il dominio di studio del problema sono state caratterizzate. Ad alcune di esse mancano alcune particolarizzazioni che verranno aggiunte più avanti e sopra ogni cosa non sono associate, per ora, ad alcuna mesh. Di questo aspetto ci si occuperà nei prossimi paragrafi.

Un passaggio che vale la pena evidenziare è quello della comunicazione tra le due superfici che costituiscono le porzioni di cilindro esterno ed interno.

Esse devono essere collegate e costituire un'interfaccia unica attraverso la quale deve avvenire lo scambio di informazioni. Pertanto, verranno associate definendo un'**interfaccia** di tipo **in-place**.

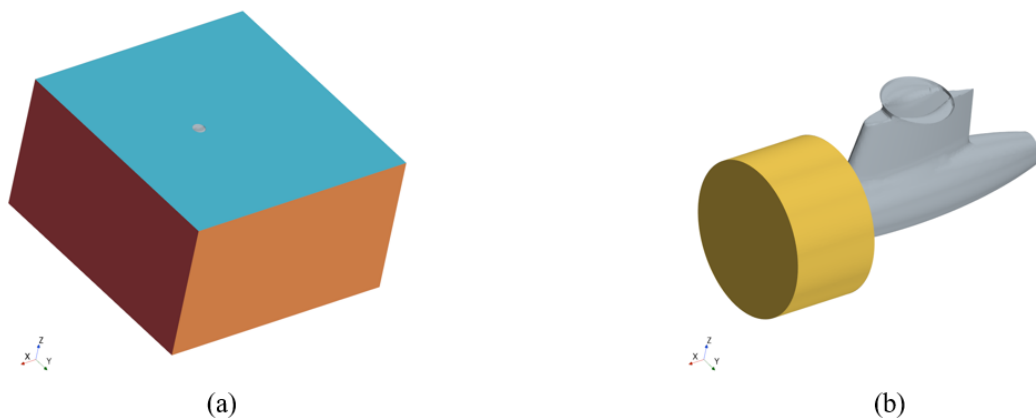


Figura 28. (a) *Region Esterna*, (b) *Region Interna*.

Una volta definito il dominio di calcolo dal punto di vista fisico e geometrico, prima di parlare della fisica e di come viene impostato il problema, il passo successivo che è stato seguito è la scelta e la definizione della mesh.

## 2.2 Le Mesh di calcolo

La definizione della mesh di calcolo è il passo fondamentale sul quale si basa gran parte di qualsiasi analisi effettuata mediante CFD.

La **creazione della mesh** di fatto consiste nella discretizzazione del dominio, definito nei paragrafi precedenti, per mezzo di celle volumetriche di dimensione e forma stabilite a priori.

### 2.2.1 Definizione delle Mesh

Per la maggior parte delle simulazioni condotte in questa campagna, sono state impostate due mesh differenti, assegnate poi alle due *Region* con cui è stato suddiviso il dominio di calcolo.

In particolare, sono state definite le seguenti:

- **Mesh Trimmer**, è stata assegnata alla *Region Esterna* ed è caratterizzata da celle di forma parallelepipedica.

La scelta di questa mesh, per la porzione esterna del dominio di calcolo, risiede nel dover rappresentare un fluido che si sposta principalmente in una direzione, coincidente con quella dell'asse x. La *trimmer* risulta infatti adeguata a rappresentare il passaggio di informazioni in una direzione specifica, come può essere un flusso di particelle in una direzione prevalente;

- **Mesh Poliedrica**, è stata assegnata alla *Region Interna* ed è caratterizzata da celle volumetriche di forma poliedrica, questo al fine di trasmettere ed esprimere meglio il passaggio di informazioni che si ha in prossimità dell'elica e del suo mozzo.

In prossimità dell'elica, per via della sua rotazione e della sua forma, si ha l'insorgenza di fenomeni vorticosi e dunque di rotazione delle particelle fluide le une rispetto alle altre. Per questo motivo è preferibile una mesh poliedrica rispetto a una *trimmer* in tale zona.

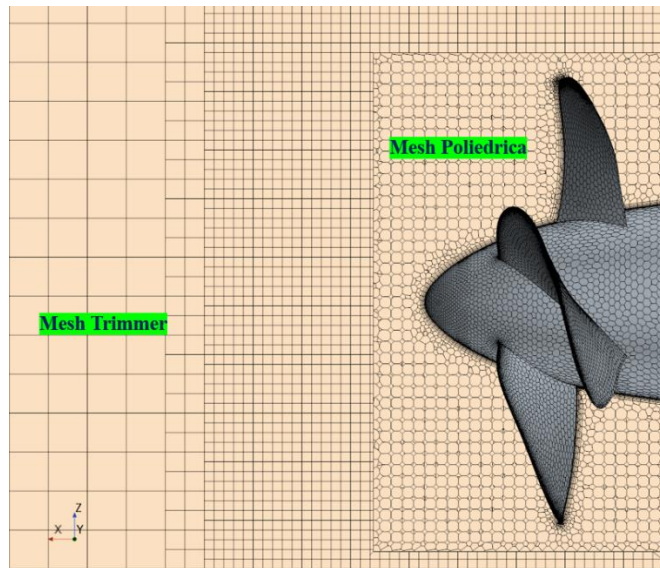


Figura 29. Mesh Trimmer e Poliedrica viste in sezione longitudinale.

Stabilita la forma delle celle delle due mesh che discretizzano il dominio di calcolo, è opportuno definirne le dimensioni in modo tale da andare a catturare i fenomeni, che si vogliono simulare, nel modo adeguato.

Per definire le **dimensioni delle celle**, il parametro fondamentale da stabilire è la **base size**, ovvero la dimensione massima delle celle del dominio lontane dalla zona di interesse.

Oltre a questo parametro, è possibile impostare la dimensione minima e media delle celle di superficie, in percentuale rispetto alla base size, delle due mesh. In tabella 5 si illustrano i valori assunti:

	<b>Relative Minimum Size</b>	<b>Relative Target Size</b>
<b>Mesh Trimmer</b>	25%	100%
<b>Mesh Poliedrica</b>	5%	25%

Tabella 5. Dimensioni minima e standard delle celle di superficie per le due mesh in percentuale rispetto alla base size.

Sebbene si abbia a che fare con due mesh diverse, si è scelto di impostare per entrambe lo stesso valore di base size.

Questo parametro assume un ruolo fondamentale nella scelta della mesh di riferimento con cui effettuare la campagna di simulazioni obiettivo di questo elaborato. Motivo per cui il valore da attribuire alla base size è stato oggetto della prima parte di campagna di simulazioni che prende il nome di **analisi di convergenza**, della quale si parlerà più avanti.

L'impostazione della mesh di calcolo non passa esclusivamente da questo concetto, ci sono diverse opzioni e comandi che, su STAR-CCM+, permettono di definire al meglio la discretizzazione del dominio.

Per esempio, un fenomeno importante da definire correttamente è lo **strato limite**.

### 2.2.2 Strato limite

Si è osservato che fare una mesh intorno ad un corpo è di per sé semplice. Mentre la costruzione dello strato limite è la parte che richiede maggior attenzione; infatti, è proprio la costruzione del *prism layer* che determina la “bontà” di una mesh.

Per strato limite si intende lo strato sottile che si forma in prossimità dell'interfaccia tra due fluidi oppure tra un fluido e un solido, in movimento relativo tra loro.

Ad esempio, prendendo in esame il caso di un cilindro fermo immerso in fluido in movimento, la velocità del fluido sulla superficie del cilindro deve essere uguale alla velocità del cilindro stesso, quindi in questo caso uguale a zero.

La velocità tende poi a crescere progressivamente fino al raggiungimento della velocità indisturbata del fluido, man mano che ci si allontana dalla superficie del cilindro.

Questo avviene a causa delle caratteristiche viscosse del fluido, modellate con la condizione al contorno di “no slip wall” sui solidi in esso immersi. La distanza necessaria al fluido per variare la sua velocità da 0 alla velocità indisturbata del fluido è quindi detta spessore dello strato limite.

Su STAR-CCM+ la discretizzazione dello strato limite si effettua impostando i *prism layers*, ovvero le celle prismatiche nelle quali prevalentemente si svilupperà lo strato limite del fluido a contatto con il corpo. Il “raffinamento” di queste celle viene effettuato in modo che le celle predisposte contengano più o meno tutto lo spessore di strato limite.

Per come sono fatte le celle hanno caratteristiche che semplificano, migliorano e favoriscono la soluzione dei flussi, dei gradienti di velocità, che si sviluppano nello strato limite del fluido.

Esso si genera sulle superfici con una *boundary* di tipo *wall* e la sua definizione passa attraverso l'assegnazione di tre grandezze :

- **Number of prism layer**, ovvero il numero di strati con cui si suddivide lo spessore dello strato limite;
- **Prism layer stretching**, rapporto tra le altezze, o allungamento relativo, di due strati contigui;
- **Prism layer thickness**, spessore globale dello strato limite da modellare.

Per controllare la scelta di questi parametri si è osservato che il valore della funzione di campo **Wall Y+**, adimensionale, avesse valori sufficientemente accettabili nell'intervallo di funzionamento del modello di turbolenza  $k-\omega$  impiegato per le simulazioni. In particolare, il suo valore è stato osservato sul contorno della geometria da analizzare, ovvero il pod.

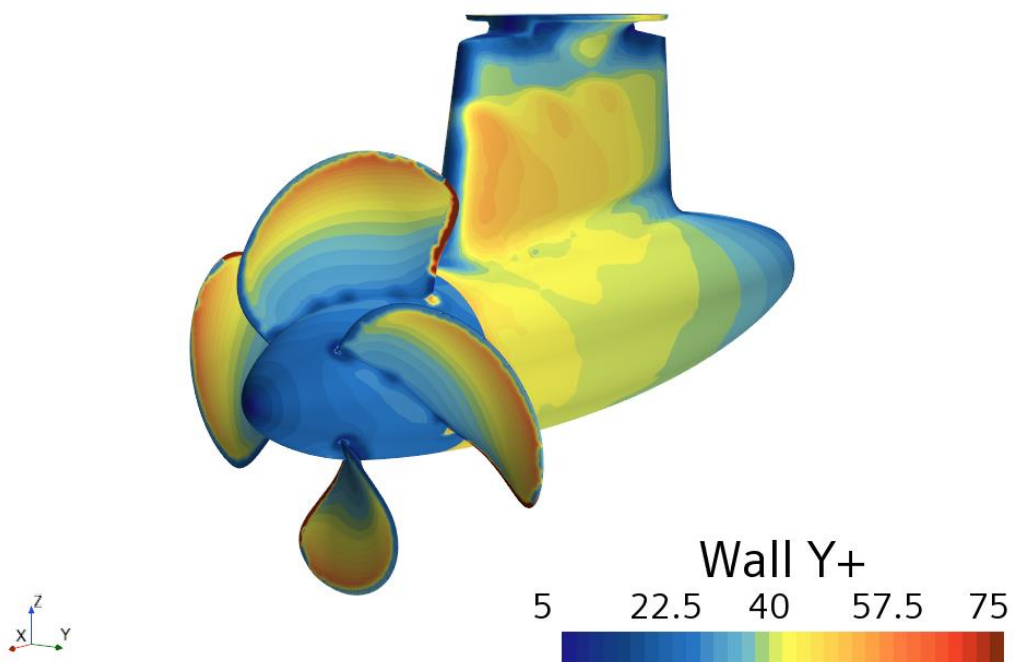


Figura 30. Wall Y+ sulla superficie del pod per una *base size* pari a 0.18 m.

In Fig. 30 si può osservare l'andamento di questa grandezza su tutta la superficie del pod per una base size di 0.18 m, sia per mesh interna che esterna.

In tabella 6 si evidenziano i parametri fondamentali per la definizione dello strato limite, diversi da una mesh all'altra.

	<b>Mesh Esterna Trimmer</b>	<b>Mesh Interna Poliedrica</b>
<b>Numero di strati</b>	6	6
<b>Prism layer stretching</b>	1.5	1.3
<b>Spessore dello strato limite</b>	0.008 [m]	0.0025 [m]

Tabella 6. Valori dello strato limite per il caso di Figura 18.

Lo spessore dello strato limite è stato calcolato a partire dal numero di Reynolds dell'elica e del pod, utilizzando una delle tante formule che vengono proposte in letteratura per calcolare lo spessore dello strato limite in regime turbolento per lastra piana, questo alla velocità del campo di moto che si ha per  $J = 0.847$ .

$$Re = \frac{V_A \cdot L}{\nu}$$

$$\delta = 0.37 \cdot L / \sqrt[5]{Re}$$

Dove L coincide con il diametro dell'elica per l'impostazione dello strato limite della mesh interna e invece con la lunghezza della gondola per l'impostazione dello strato limite della mesh esterna.

Come si può osservare dalla figura 18, i valori di Wall Y+ sono più o meno ovunque superiori a 15 a parte in zone particolarmente difficili da approssimare come il tip dell'elica o altre zone di raccordo di dimensioni molto ridotte. Questo è concorde con il metodo di risoluzione della turbolenza utilizzato; pertanto, i valori utilizzati in tabella 5 per definire lo strato limite saranno poi quelli utilizzati per tutta la campagna di simulazioni.

### 2.2.3 Mesh grading level e raffinamenti volumetrici

Oltre alla definizione dello strato limite, per definire al meglio la mesh di calcolo, diventa molto importante il concetto di *mesh grading level*.

La definizione della base size, fa sì che la mesh, piano piano che si avvicina al corpo di studio, presenti delle celle di dimensioni sempre minori, questo al fine di ottenere una soluzione il meno approssimata possibile.

Ciò però non è sufficiente, diventa imprescindibile andare a particularizzare la mesh su alcune delle *patches* con cui si è divisa la superficie del pod, in particolare sulle pale dell'elica.

Si opera andando a impostare la dimensione delle celle, in prossimità delle zone che ci interessano del dominio di calcolo, “customizzando” le celle di superficie, ovvero impostando i seguenti parametri:

- **Relative target size**, ovvero la dimensione media, relativa alla base size, delle celle sulla superficie del corpo;
- **Relative minimum size**, dimensione minima, relativa alla base size, delle celle sulla superficie del corpo.

Le *patches* che si è deciso di customizzare sono:

- **PodEsterno**, superficie di gondola e pod, appartenente alla region esterna;
- **Mozzo**, superficie del mozzo, appartenente alla region interna;
- **Pale dell'elica**, superficie delle pale, appartenenti alla region interna.

In tabella 7 si illustrano i valori di *surface mesh size* utilizzati per la campagna di simulazione associa.

	<b>Pod Esterno</b>	<b>Mozzo</b>	<b>Pale dell'elica</b>
<b>Relative target size</b>	1.8	1.8	0.05
<b>Relative minimum size</b>	1	0.5	1

Tabella 7. Valori di target e minimum size delle celle di superficie in percentuale rispetto alla base size.

L'ultimo step effettuato per discretizzare al meglio il campo di moto fluido del problema in esame, al fine di descrivere al meglio i fenomeni di interesse, è stato quello di definire dei **volumi di raffinamento**. Ovvero delle zone della mesh caratterizzate da celle più fitte rispetto a quelle normali che si avrebbero.

Su STAR-CCM+ la definizione di queste zone prende il nome di **volumetric controls**.

Per la campagna di simulazioni effettuate sono stati impostati due volumi di raffinamento specifici:

- **Raffinamento azimuth**, impostato mediante la definizione di un cilindro di raggio 0.8 m e di altezza pari a 0.365 m centrato come l'asse z del pod.  
Definito per seguire al meglio il campo di moto in funzione della rotazione del pod ai veri angoli di azimuth;
- **Raffinamento scia**, impostato definendo un cilindro di raggio pari a 0.14 m e altezza pari a 1.1 m coassiale con il disco dell'elica.  
Definito per descrivere e raffinare la scia creata dall'elica e quindi per seguire al meglio i fenomeni turbolenti ivi prevalenti. Questo raffinamento, al variare dell'angolo di azimuth segue la rotazione del pod.

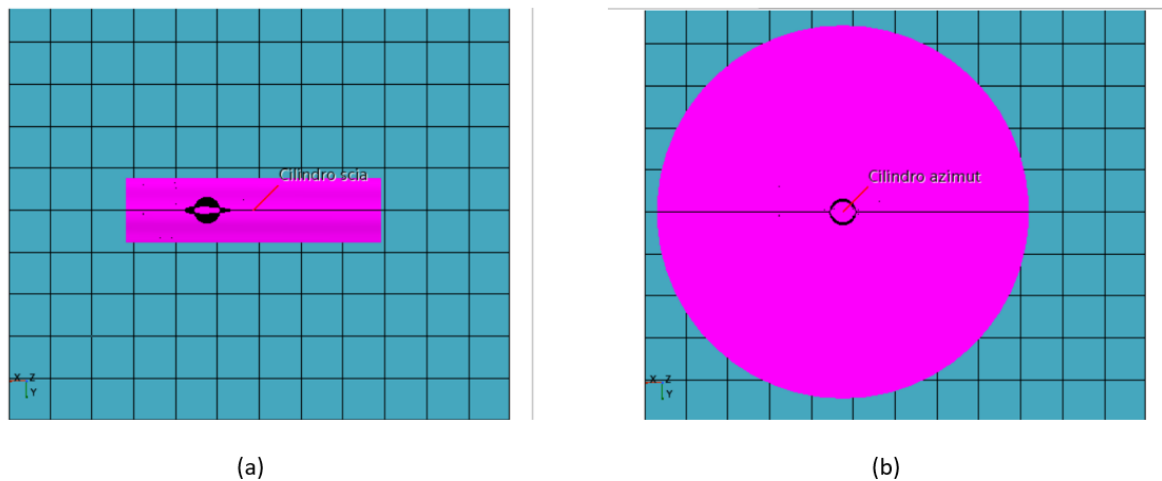


Figura 31. Raffinamenti volumetrici visti nel piano XY.

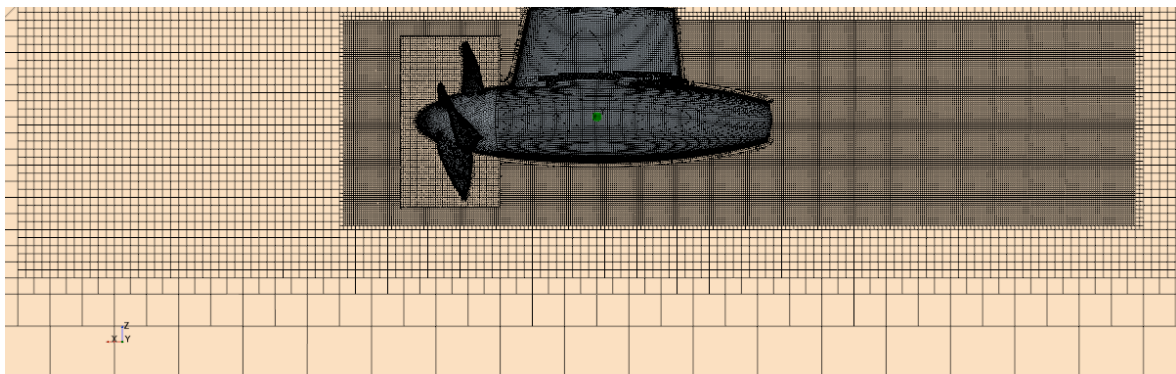


Figura 32. Raffinamento azimuth e raffinamento scia visti nel piano XZ.



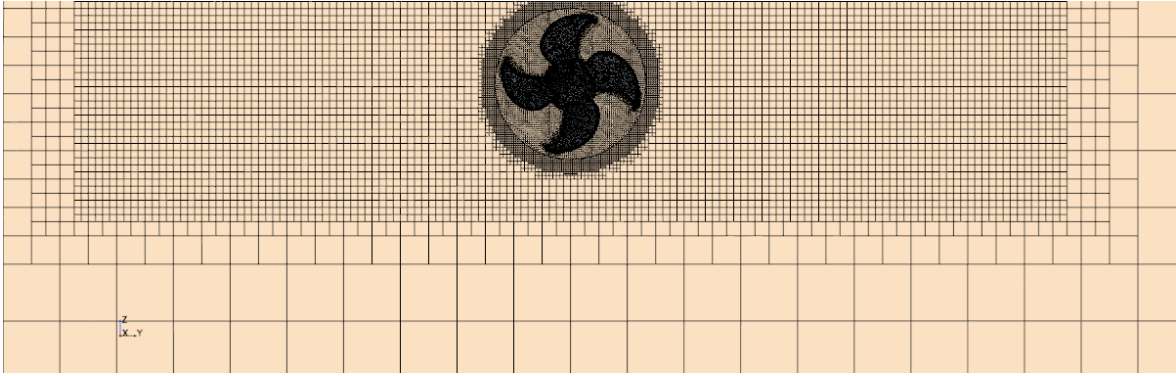


Figura 33. Raffinamento azimuth e raffinamento scia visti nel piano YZ.

## 2.3 Fisica del problema

Una volta impostata la geometria e la mesh di calcolo, al fine di ricreare al meglio la situazione degli esperimenti in vasca del 2004, è stata definita la fisica del problema.

Ciò che si è dovuto rappresentare è un pod con elica in movimento ai diversi angoli di azimuth in condizioni stazionarie.

Per fare ciò, si è impostato il problema assumendo il pod fermo investito da un flusso diretto contrariamente all'asse x con elica in movimento, rotazione destrorsa. Ciò produce un **campo di moto fortemente non stazionario**, a causa della rotazione dell'elica e delle turbolenze che nascono per la presenza del pod, soprattutto ad angoli di azimuth diversi da zero.

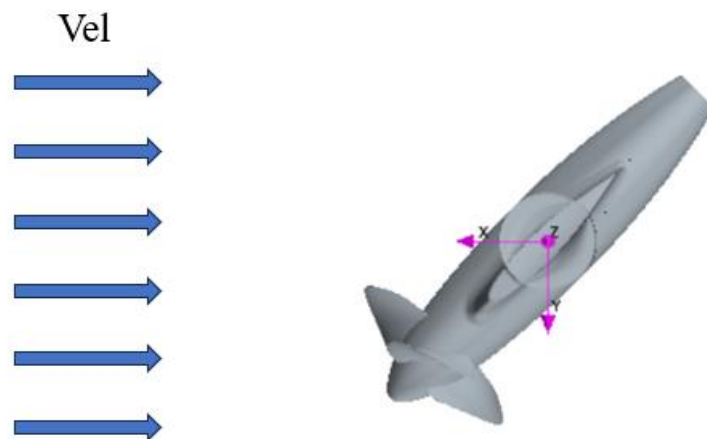


Figura 34. Pod investito da un campo di velocità uniforme con pod ruotato di  $\psi = 45^\circ$ .

L'imposizione di queste condizioni di funzionamento deve avvenire nell'ambiente CFD attraverso alcuni passaggi, in modo da rappresentare al meglio la situazione senza errori dovuti all'algoritmo di approssimazione delle equazioni e alla mesh.

Il problema, infatti, è che per far girare l'elica in modo adeguato, è necessario impostare una velocità di rotazione di essa molto alta, per esempio di un grado al secondo, ciò vuol dire che per effettuare un giro completo ci vogliono almeno 360 iterazioni temporali che, come illustreremo, saranno sotto-risolte con cinque iterazioni "stazionarie". Per avere un campo di moto avviato, questo comporta moltissimi step di calcolo, poiché si vuole far arrivare il flusso di particelle accelerate dall'elica il più possibile verso l'outlet.

Per tale motivo si è deciso di scomporre la fase di calcolo in due sottofasi:

- **Soluzione MRF**, nella quale il campo di moto è impostato come stazionario, con conseguente modifica delle equazioni di *Navier-Stokes*;
- **Soluzione Non Stazionaria**, nella quale il campo di moto è impostato come "*Implicit Unsteady*". Le equazioni saranno risolte nel tempo.

La soluzione MRF è necessaria per avviare dunque la soluzione; se si usasse direttamente una soluzione non stazionaria, sarebbero necessarie più rivoluzioni dell'elica per avere un regime verosimile del campo di moto e l'onere computazionale crescerebbe di conseguenza. Prima di illustrare queste sottofasi di calcolo, è utile definire alcune *Field Function*, o funzioni di campo, utilizzate per impostare le simulazioni.

<b>Coefficiente d'avanzo</b>	$J = \frac{V_A}{nD}$	[-]
<b>Numero di giri</b>	$n = 15$	[rps]
<b>Velocità del flusso uniforme</b>	$Vel = JnD$	[m/s]
<b>Intervallo angolare di rotazione dell'elica</b>	$DT_{angolare} = 1$	[°]
<b>Step temporale di simulazione</b>	$DT = \frac{1}{n} \frac{1}{360^\circ} DT_{angolare}$	[s]
<b>Numero di rivoluzioni dell'elica</b>	N	[-]
<b>Iterazioni</b>	$I = \frac{N \cdot 360^\circ}{DT_{angolare}}$	[-]

Tabella 8. *Field function* utilizzate per impostare le simulazioni.

Di fatto ogni simulazione eseguita richiede come **valori di input** il valore del **coefficiente d'avanzo**, dal quale si ricava il valore della velocità del campo di moto uniforme che investe il pod fermo, e il **numero di rivoluzioni** che si vuol far fare all'elica.

Si osserva che è stato impostato come intervallo di rotazione angolare dell'elica pari a  $1^\circ$  e un numero di giri dell'elica pari a 15 [rps], questo in maniera concorde a quanto fatto nell'esperimento di Heinke.

### 2.3.1 Soluzione MRF

Come detto sopra, ogni simulazione è stata fatta dividendola in due sotto-soluzioni, la prima è la **soluzione MRF**.

Per ogni caso, si imposta un regime del campo di moto stazionario, quindi con equazioni di *Navier-Stokes* non dipendenti dal tempo, in modo tale da avviare il flusso nel dominio.

Di fatto, questa sotto-soluzione agisce come “base” per la soluzione non stazionaria che ricrea in maniera realistica il problema in esame e sui quali dati viene fatto il confronto con i risultati sperimentali.

Ora, il campo di moto che si genera con la soluzione successiva non stazionaria è turbolento; per ricreare in maniera fittizia la vorticosità delle particelle si è impostato, su STAR-CCM+, un ***Moving Reference Frame*** (MRF), con cui si simula la rotazione rigida e la traslazione di una *Region* senza muovere la mesh.

L'utilizzo dei *reference frame* è di largo impiego per simulare le rotazioni rigide e per avviare le soluzioni non stazionarie, ha infatti come vantaggio quello di essere stazionario e non richiede il moto della mesh.

Il *reference frame* così definito viene associato alla *region interna* che è caratterizzata da un moto stazionario, quindi è immobile di fatto.

Questo passaggio, seppur apparentemente irrilevante, fa sì che la soluzione del campo di moto, calcolata all'interno della *region* che avvolge l'elica, sia comprensiva anche delle componenti di vorticità e di rotazione delle particelle, avviando il flusso nel modo migliore possibile per la soluzione non stazionaria successiva. È per questo motivo che l'MRF viene definito con rotation rate pari a 15 rps.

Prima di descrivere la soluzione non stazionaria si osserva che la **boundary** dell'**inlet** è stata impostata assumendo come velocità di ingresso la *field function* “Vel” definita precedentemente.

Per quanto riguarda le **equazioni**, si è ipotizzato di avere a che fare con un flusso a densità costante ( $\rho = 997 \text{ [Kg/m}^3\text{]}$  e  $\nu = 8.8 \times 10^{-4} \text{ [Pa} \cdot \text{s]}$ ) in regime turbolento, con modello di soluzione della turbolenza  $k-\omega$ , e velocità iniziale opposta all'asse x e pari al valore definito con la *field function* “Vel”.

Il numero di iterazioni stazionarie che eseguirà l'algoritmo sarà pari alla *field function* “Iterazioni”.

Si osserva che essa è dipendente dal numero di rivoluzioni dell'elica, parametro che va deciso in input e per la soluzione stazionaria MRF è assunto pari a 3. Numero di rivoluzioni dell'elica necessario affinché una particella fluida superi l'intera lunghezza del pod, seguendo una traiettoria elicoidale causata dall'elica.

Ne segue che il numero di iterazioni stazionarie sarà pari a 1080.

### 2.3.2 Soluzione Non-Stazionaria

Una volta risolta la soluzione stazionaria, nelle sue 1080 iterazioni, il passo successivo è quello di convertire quella stessa simulazione in non stazionaria, utilizzando come base i valori preesistenti del campo di moto avviato stazionario.

Su STAR-CCM+ si cambia la fisica del problema, impostando un regime *Implicit Unsteady* turbolento e modello di turbolenza sempre  $k-\omega$ .

Utilizzato anche per la soluzione MRF, questo modello consiste nell'assumere delle equazioni di *Navier-Stokes* mediate alla *Reynolds* e risolte con l'introduzione di due grandezze  $k$  e  $\omega$ , aumentando così il numero di equazioni a disposizione.

Una volta cambiata la fisica si toglie il *reference frame* associato alla *Region Interna* e le si associa un moto di rotazione rigida vero e proprio nel sistema di riferimento ruotato con l'elica. In questo modo, tutti gli elementi di questa regione saranno soggetti a tale moto, in particolar modo le pale dell'elica.

La velocità di rotazione è pari al numero di giri dell'elica usato negli esperimenti in vasca, ovvero 15 rps.

Ora, la soluzione è non stazionaria, quindi le equazioni da risolvere e da approssimare comprendono la variabile tempo.

Pertanto, è necessario definire un *time step* di simulazione e un numero finito di iterazioni temporali da far eseguire all'elica.

Per la campagna di simulazioni è stato utilizzato come *time step* il valore ottenuto dalla *field function* "DT", definita, come si può vedere in tabella 8, in funzione di "DT<sub>angolare</sub>" e del numero di giri dell'elica.

In questo modo, ogni intervallo temporale di simulazione coincide con il tempo necessario per compiere un grado di rotazione dell'elica alla velocità angolare data ricavata dal numero di giri reale dell'elica.

Il numero totale di intervalli temporali della simulazione è invece definito dalla *field function* "Iterazioni" che prende come input il numero di rivoluzioni che si decide di far compiere all'elica e lo moltiplica per il numero di intervalli angolari con cui si è discretizzato il giro, ovvero 360.

Ne segue che, per esempio, per compiere tre rivoluzioni dell'elica saranno necessarie  $3 \times 360$  Iterazioni temporali.

Per concludere, in funzione della scelta del metodo RANS per la risoluzione delle equazioni di *Navier Stokes*, è stato necessario scegliere il **numero di sotto-iterazioni stazionarie** con cui viene risolta la singola iterazione temporale non stazionaria; per tutte le simulazioni è stato assunto pari a cinque.

In figura 35 si può vedere la differenza nel campo di moto fluido, per quanto riguarda la componente x della velocità, generato dalle due soluzioni, stazionaria e non stazionaria, per un valore di  $J = 0.847$  con elica in configurazione *pull* a  $0^\circ$  di angolo di azimuth.

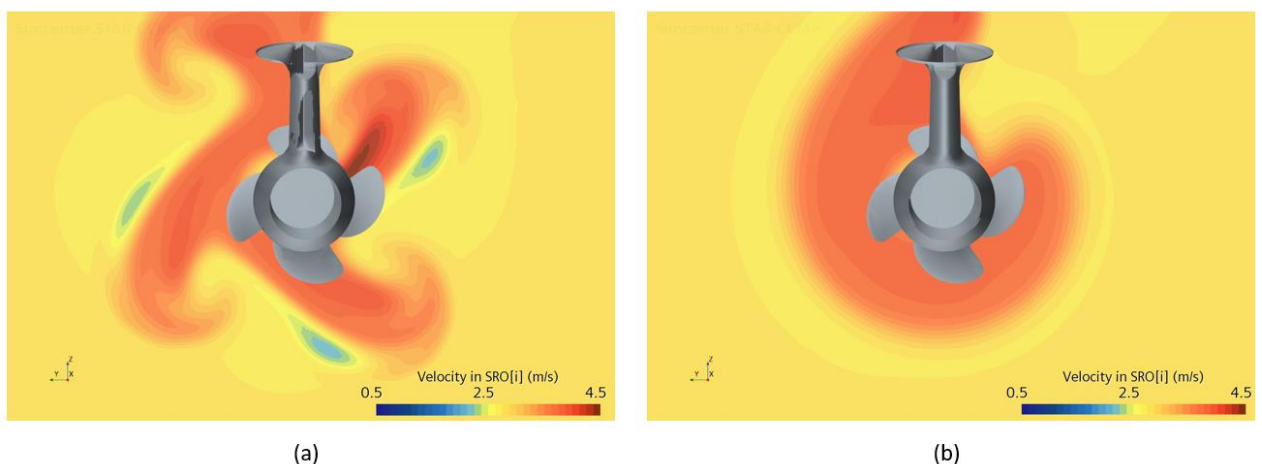


Figura 35. Componente  $V_x$  nel piano YZ posto a  $x/D = -1.3$ , per  $J = 0.847$  a  $\psi = 0^\circ$ . Soluzione MRF (a), soluzione Non-Stazionaria (b).

Con riferimento alla figura sopra, si può osservare che:

- **Soluzione MRF:** essendo l'elica ferma, il campo di velocità che si viene a creare dietro al pod è quello tipico di un flusso che investe un corpo tozzo fermo. Si osservano fenomeni turbolenti e vorticosità in quattro porzioni, che evidenziano la presenza delle quattro pale ferme dell'elica;
- **Soluzione Non-Stazionaria:** l'elica è in movimento, il campo di velocità che si genera a valle è caratterizzato da un tubo di flusso, con particelle accelerate, circolare, nel piano, generato dalla rotazione dell'elica. L'elica gira a 15 rps e la velocità d'ingresso pari a 2.79 m/s viene accelerata fino a 4.5 m/s.

### 2.3.3 Calcolo dei coefficienti

Una volta concluse le simulazioni, per ogni forza valutata in entrambi i sistemi di riferimento, è stato calcolato il relativo coefficiente adimensionale.

Ora, le azioni vengono estratte sotto forma di **storie temporali**, con un valore preciso per ogni istante temporale di simulazione "DT"; pertanto, è necessario ridurle ad un unico valore, prima di poterle adimensionalizzare e prima di effettuare un confronto coi dati sperimentali.

Nello specifico, per ogni componente di ciascuna azione, è stata effettuata una **media temporale** fatta sull'ultimo giro di rivoluzione dell'elica. Quindi una media fatta sugli ultimi 360 istanti temporali, ricordando che il singolo istante temporale coincide con un grado di rotazione dell'elica.

Prendendo come esempio il  $K_{TP}$  nel sistema di riferimento ruotato con l'elica, l'operazione è la seguente:

$$K_{TP_{ruotato}} = \left( \frac{1}{\rho n^2 D^4} \right) \frac{1}{360} \sum_{I=360}^I T_{X_{elica_{ruotato}}}$$

Dove I è il numero di iterazioni totali della simulazione, pari al numero di istanti temporali per quella Non-Stazionaria e pari al numero di iterazioni stazionarie per quella MRF.

Questa operazione di estrazione dei coefficienti, per entrambe le sotto-simulazioni, è stata effettuata per le seguenti grandezze:  $\vec{F}_{gondola}$ ,  $\vec{F}_{piede}$ ,  $\vec{T}_{elica}$  e  $\vec{T}_{pala}$ , in tutte e tre le loro componenti nei due sistemi di riferimento fisso e ruotato.

Per quanto riguarda  $Q_p$  e  $M_{z_{totale}}$ , il primo è stato valutato solamente nel riferimento ruotato con l'elica, mentre il secondo nel riferimento fisso.

I coefficienti sono ottenuti da una media nell'ultimo giro in quanto si suppone che verso la coda della simulazione la soluzione che si ottiene sarà il più stabile possibile e pseudo periodica. Si vedrà poi che, nelle condizioni di rotazione del pod più complicate, il numero di rivoluzioni da far fare all'elica, dunque il numero di iterazioni non stazionarie, per ottenere una soluzione stabile dovrà essere elevato e non sempre sufficiente affinché il flusso si stabilizzi e alcune delle forze presentino carattere periodico.

Nel corso di quest'analisi non si è mai andati oltre le 16 rivoluzioni dell'elica, ovvero 5760 istanti temporali, perché avrebbe comportato un tempo di calcolo eccessivo.

### 3. Analisi di convergenza

Una volta definito il modello utilizzato per effettuare la campagna di simulazioni, il passo successivo è la scelta della dimensione delle celle della mesh di calcolo.

Si ricorda infatti che il parametro fondamentale con cui sono state definite le due mesh, poliedrica e trimmer, è la **base size**. Tale valore, di norma, viene inizialmente assunto pari al valore della dimensione principale caratteristica dell'oggetto che si vuole rappresentare. Nel nostro caso il diametro dell'elica  $D = 0.22$  m.

Ora, più si diminuisce il valore massimo delle dimensione delle celle lontane, più i risultati ottenuti dalla soluzione approssimata delle equazioni di *Navier-Stokes* saranno vicini a quelli sperimentali/reali ai quali si vuole tendere.

Il processo di riduzione della dimensione principale delle celle di una mesh prende il nome di **raffinamento**. Risulta abbastanza semplice pensare che più si riesce a “infittire” il dominio, più l'analisi CFD sarà accurata; aumenteranno infatti le interpolazioni effettuate dall'algoritmo di approssimazione delle equazioni.

Celle molto piccole dunque garantiscono, quasi sempre, risultati più precisi, ma il tempo di calcolo crescerà esponenzialmente. Ai fini di un'analisi fruibile per la normale progettazione è opportuno trovare il giusto compromesso.

Fino a questo punto, nella nostra analisi, non è stato definito il valore di base size utilizzato per effettuare la campagna di simulazioni.

La scelta di tale valore deve essere effettuata mediante un processo che prende il nome di **analisi di convergenza**.

L'idea è di effettuare una serie di simulazioni, partendo da un valore di base size vicino alla grandezza caratteristica del fenomeno, via via aumentando il numero di celle per arrivare il più vicino possibile ai risultati ottenuti con gli esperimenti.

Facendo riferimento al caso *pull*, si è scelto di simulare il comportamento a tre diversi angoli di azimuth a un valore di J pari a 0.847, che chiameremo  $J_{\text{progetto}}$ , per  $n = 15$  rps.

Per ogni angolo sono stati preparati un numero di casi pari al numero di **base size** da provare.

I valori considerati sono i seguenti:

$\psi = 0^\circ$	0.12	0.14	0.16	0.18	0.20	0.22	0.25	0.30
$\psi = 45^\circ$	0.12	0.14	0.16	0.18	0.20	0.22	0.25	0.30
$\psi = 90^\circ$	-	-	0.16	0.18	0.20	0.22	0.25	0.30

Tabella 9. Valore di **base size** in funzione dell'angolo di rotazione del pod.

Si osserva che le situazioni di pod ruotato a  $0^\circ$  e  $45^\circ$  sono state “infittite” di più in quanto principalmente è il range di angoli tra  $0^\circ$  e  $60^\circ$  ad essere importante e più facile dal punto di vista del calcolo. Questo anche a causa della difficoltà dovuta all'insorgere di fenomeni turbolenti maggiori associati ad angoli di azimuth più alti, come  $90^\circ$  per esempio.

Un'analisi di convergenza fatta in relazione a tale configurazione diventa chiaramente più complessa e richiederebbe un infittimento eccessivo della mesh, motivo per cui per cui la scelta della base size verrà poi fatta in funzione dei risultati ottenuti dalle mesh a  $0^\circ$  e  $45^\circ$  soprattutto.

Per effettuare l'analisi di convergenza i coefficienti di riferimento per il confronto con i dati sperimentali sono stati i seguenti:  $K_{TP}$ ,  $K_{FYP}$ ,  $K_{FZP}$ ,  $K_{QP}$ ,  $K_{Tx}$ ,  $K_{Ty}$ ,  $K_{Tz}$  e  $K_{Mz}$ .

Dove  $K_{TP}$ ,  $K_{FYP}$ ,  $K_{FZP}$  e  $K_{QP}$  sono presi nel sistema di riferimento ruotato, mentre  $K_{Tx}$ ,  $K_{Ty}$ ,  $K_{Tz}$  e  $K_{Mz}$  sono presi nel riferimento fisso.

L'analisi di convergenza così condotta si divide in tre passi:



- **Impostazione e lancio dei casi**, in particolare si è scelto di effettuare 1080 iterazioni stazionarie per la sotto-simulazione MRF e cinque rivoluzioni dell'elica, ovvero 1800 iterazioni temporali, per la sotto-simulazione Non-Stazionaria;
- **Validazione della mesh e del modello**, dove caso per caso, sono stati confrontati i valori dei coefficienti estratti dai diversi casi con i rispettivi risultati sperimentali, al fine di verificare che il modello e la mesh impostata siano coerenti con ciò che si vuole rappresentare;
- **Analisi di convergenza e scelta della mesh**, in cui per ognuno dei tre angoli di azimuth si estrapola la curva di tendenza della mesh al variare del coefficiente adimensionale in esame. Una volta definite le curve, una per ogni coefficiente per  $\psi = \{0^\circ, 45^\circ, 90^\circ\}$ , si confrontano con i risultati ottenuti dalle simulazioni Non-Stazionarie CFD.

In funzione dei valori e degli errori commessi si sceglie il valore di **base size** con cui impostare la campagna di simulazioni vera e propria.

Il primo passo segue le procedure illustrate nel paragrafo 2 di questo capitolo, si impostano tre configurazioni *pull* che differiscono per l'angolo di rotazione del pod e per ognuna si danno i valori di base size riportati in tabella 9 ottenendo un dato numero di simulazioni identiche per fisica ma diverse per discretizzazione.

Per quanto riguarda gli altri due step, si illustrano nei successivi due paragrafi le procedure seguite.

### 3.1 Validazione delle mesh e del modello

Come detto sopra, una volta ottenuti i risultati delle simulazioni MRF e Non-Stazionarie per i tre diversi angoli di azimuth, alle diverse base size, sono stati calcolati i coefficienti adimensionali delle azioni risultanti nell'ultimo giro.

In funzione dei dati sperimentali, sono stati confrontati i valori e, una volta osservato che non differiscono significativamente (differenze per  $10^{-2}/10^{-3}$ ) si è assunta la robustezza e funzionalità del modello creato e di conseguenza della scelta del tipo di mesh utilizzata.

Per concludere, rimane da scegliere la mesh da utilizzare per la campagna di simulazioni.

### 3.2 Analisi di convergenza e scelta della mesh

In cosa consiste l'analisi di convergenza? Verso cosa si deve convergere?

Di fatto essa consiste nell'andare a vedere cosa succede aumentando all'infinito il numero di celle del dominio, operazione che in linea teorica dovrebbe portare alla coincidenza tra soluzione reale, sperimentale, e soluzione approssimata, CFD.

Chiaramente questo processo è puramente astratto, in quanto è impossibile disporre di un numero infinito di celle per cui le equazioni approssimate coincidano con quelle reali. L'idea è però andare a ricreare una curva che per  $N \rightarrow +\infty$  mi fornisca il dato valore del coefficiente adimensionale; questo sulla base dei risultati ottenuti per ogni angolo di azimuth con le diverse base size a cui corrispondono delle mesh con un determinato numero di celle,

Per effettuare l'analisi di convergenza ci si può avvalere di diversi algoritmi, quello utilizzato in questa tesi consiste nel costruire una curva sulla base dei risultati ottenuti con le diverse simulazioni, mediante interpolazione ai minimi quadrati secondo polinomi di grado  $\geq 1$ . Dove il grado del polinomio corrisponde alla velocità con cui si riduce l'errore.

Per fare questo ci si è avvalsi di un programma apposito: "*numerical\_uncertainty.exe*", un eseguibile, fornito da Eça, L., & Hoekstra, M. (2014), che prende in input il numero di celle del determinato caso e il relativo valore della grandezza sulla quale si vuole valutare la convergenza [13].

Una volta lanciato esso fornisce in output un file.dat in cui sono presenti un determinato numero di punti definibili da due coordinate ( $x; y$ ) dove:

- $x = \sqrt[3]{\frac{\text{Numero massimo di celle}}{\text{Numero locale di celle}}}$  – il numero massimo di celle è quello della simulazione eseguita con base size più piccola, mentre il numero locale di celle è quello di un'ipotetica mesh con una data base size;
- $y = \text{Grandezza in esame}$  – ovvero il valore ipotetico della grandezza in esame che si avrebbe in funzione di una data base size teorica definita dalla curva estrapolata.

Oltre alla serie di punti che compongono la curva, vengono forniti i valori di  $x$  e  $y$  rispettivi delle simulazioni eseguite e con cui è stata estrapolata la curva. Inoltre, è stata calcolata l'incertezza relativa a  $x = 0$ , ovvero la differenza rispetto al valore a cui corrisponde la simulazione per numero locale di celle che tende a infinito.

Questo è relativamente importante, ci fa vedere quanto siamo lontani dall'ottenere il valore ideale coincidente col dato sperimentale della grandezza in esame, ossia il coefficiente adimensionale nella data configurazione. In base a questo valore si fa l'analisi di convergenza.

È da osservare che la curva creata in questo modo prescinde dal valore esatto sperimentale, che si dovrebbe avere per numero locale di celle pari a  $\infty$ , essendo un metodo fatto per provare la convergenza nel caso non si abbia a disposizione l'analisi sperimentale per il confronto.

Essendo noti, nel caso in esame, i valori esatti che si dovrebbero ottenere per infinite celle, va da sé che il valore per  $x = 0$  (numero locale di celle infinite) che si ottiene dal programma non coincide con quello dei risultati sperimentali.

Inoltre, le grandezze con cui si testa la convergenza sono tante, otto coefficienti per tre diversi angoli di azimuth. In tal caso diventa difficile ottenere gli stessi valori di incertezza numerica per tutte le grandezze.

In ogni caso le curve interpolate sono utili per vedere quanto un valore di base size sia ragionevole in funzione di quanto si discosta dalla curva.

I risultati di questo processo verranno illustrati nel successivo capitolo assieme ai valori ottenuti dalla campagna di simulazioni condotta in questa tesi.

Come si vedrà più nel dettaglio, il valore di **base size** scelto corrisponde a 0.18 e tale valore è stato mantenuto per definire tutte le mesh di tutti i casi *pull* e *push* analizzati ai diversi angoli di azimuth.

## 4. Modello con disco attuatore

Una volta terminata la campagna di simulazioni dedicata al confronto tra i risultati ottenuti mediante CFD e prove sperimentali in vasca, sono state effettuate delle simulazioni utilizzando il **modello del disco attuatore** in configurazione *Pull*, sostituendolo all'elica. Questo al fine di verificare se esiste la possibilità di un metodo, CFD, più semplice rispetto a quello comprendente anche l'elica. In tal modo, in un'ottica di progettazione preliminare, sarebbe così possibile ridurre i tempi di calcolo necessari a studiare le prestazioni di un propulsore azimutale in regime di flusso obliquo.

Il disco attuatore, infatti, come dati base di input richiede solo il numero di giri e il diametro dell'elica, oltre alla posizione in cui deve essere disposto. Si illustra qui di seguito la sua implementazione sul software STAR-CCM+.

### 4.1 Virtual disk model

Su STAR-CCM+ il modello di disco attuatore prende il nome di *Virtual Disk Model*, il cui funzionamento è basato sulla **teoria del disco attuatore**.

L'implementazione di questa teoria è pratica quando si è interessati a studiare l'influenza dell'elica, o di un qualsiasi rotore, sul flusso indisturbato piuttosto che sul conoscere nei dettagli le interazioni tra il flusso e le pale dell'organo in rotazione in esame.

Le azioni del disco attuatore sul campo di moto intervengono nelle equazioni di momento della meccanica dei fluidi, teorema della quantità di moto, in termini di forze le cui sorgenti sono distribuite sullo spazio occupato dal disco attuatore.

Esistono vari modi per rappresentare la distribuzione della sorgente che modella le azioni del disco attuatore, per la nostra trattazione viene utilizzato il ***Body Force Propeller Method***.

#### 4.1.1 Body Force Propeller Method

Questo metodo simula l'effetto dell'elica, in particolare si modella l'interazione tra elica e carena dal punto di vista del campo di moto.

Il flusso indotto dall'elica dipende dal flusso attorno allo scafo e allo stesso modo il flusso dello scafo è influenzato dall'elica.

Il metodo offre il vantaggio di una **dimensione della mesh ridotta** e quindi di un costo computazionale ridotto rispetto all'esecuzione di una simulazione che include la geometria completa dell'elica.

L'utilizzo di questo approccio è consigliato se non è necessario conoscere in maniera dettagliata il flusso attorno all'elica, ma sono richieste solo le specifiche di propulsione corrette. Ciò è conforme con l'utilizzo che se ne vuole fare in questa tesi; infatti il campo di moto e l'interazione tra esso e le pale è già nota, nel nostro caso, grazie alle simulazioni condotte modellando in maniera completa sia la struttura del pod che l'elica assieme.

Il *body force propeller method* prevede il seguente approccio:

- Definizione del *virtual disk* dal punto di vista della posizione e della direzione nella quale si vuole generare la spinta;
- Assegnazione di una specifica curva rappresentativa delle performance dell'elica. Nel nostro caso si tratta della curva di elica isolata ottenibile a  $\psi = 0^\circ$  e  $n = 15$  rps in configurazione propulsiva del pod di tipo *pull*;
- Assegnazione di un punto di lavoro specifico, nel nostro caso il numero di giri dell'elica  $n$  pari a 15 rps;
- Definizione di un metodo di modellazione del flusso.

Una volta terminata la simulazione, è nota la distribuzione assiale e tangenziale delle forze dell'elica così modellata e i suoi effetti sul flusso. L'integrale di queste forze sull'area del disco fornisce la spinta nelle sue tre componenti e la coppia espressa dall'elica.

#### 4.1.2 Implementazione su STAR-CCM+

Assieme alla definizione della fisica si inserisce nei *Models*, rappresentativi della fisica del problema, l'opzione *virtual disk model*.

Apparirà nell'albero della simulazione una voce ***Virtual Disk*** a cui è associato automaticamente un sistema di riferimento specifico: ***Virtual Disk CSys 1***.

Questo è orientato in modo che l'asse z sia sempre normale al piano del disco e punti sempre nella direzione in cui il disco esprime la spinta.

Nel nostro caso l'asse z del disco coincide con l'asse x del sistema di riferimento elica ruotato, mentre dal punto di vista dell'asse y essi sono concordi. Ne segue che l'asse x ha la stessa direzione dell'asse z del riferimento ruotato con l'elica ma ha verso opposto.

Al fine di posizionare il disco nella maniera opportuna, è preferibile modificare l'origine e l'orientamento di esso nel nodo associato al modello di *Virtual Disk* definito sopra.

Questo e i passaggi che si illustrano in seguito sono specifici del *Body Force Propeller Method*.

Per seguire questo approccio di modellazione, devono essere seguiti i seguenti passi:

- Definizione della “**Propeller Curve**”;
- Definizione della **Geometria del Disco**;
- Assegnazione del tipo di **Distribuzione Radiale**: Spinta e coppia, solo spinta o solo coppia;
- **Specifiche** della distribuzione radiale;
- **Inflow Specification**;
- **Senso di rotazione** del disco → Elica destrorsa e quindi **disco destrorso**;
- Scelta del parametro di **input**.

#### 4.1.2.a Propeller Curve

Si assegna la curva rappresentativa delle performance dell'elica, che si vuole simulare, in due modi: usando una *Polynomial (J)* o una *Table J*.

Nel nostro caso si è scelto di assegnare una *Table J* (tabella 10) importata nel modo opportuno come file.dat.

Tale tabella è stata estratta dalla pubblicazione di *Heinke* ed è rappresentativa delle prestazioni dell'elica in termini di  $J$ ,  $K_{Tp}$ ,  $K_{Qp}$  e  $\eta_0$  per un angolo di azimuth pari a  $0^\circ$  e numero di giri dell'elica pari a 15 rps in configurazione propulsiva di tipo *Pull* della struttura completa del pod. Non si tratta dunque di una curva di elica isolata perfetta essendo le prestazioni influenzate dalla presenza della struttura del pod.

Tale tabella verrà mantenuta uguale per tutti gli angoli di azimuth ai quali sarà ruotata la propulsione costituita dal disco attuatore.

Questa scelta è legata al fatto che il disco attuatore non ha lo scopo di ricreare il comportamento esatto dell'elica, in quanto si prevede che il suo utilizzo avvenga in fase progettuale e quindi senza conoscere nello specifico le vere prestazioni dell'elica.

J	K_Tp	K_Qp	$\eta_0$
0.00	0.59	0.096	0.000
0.09	0.56	0.090	0.090
0.18	0.52	0.084	0.180
0.27	0.48	0.077	0.267
0.36	0.43	0.070	0.353
0.45	0.38	0.063	0.437
0.55	0.33	0.056	0.514
0.64	0.29	0.050	0.582
0.73	0.24	0.043	0.641
0.82	0.20	0.037	0.696
0.91	0.16	0.031	0.726
1.00	0.11	0.024	0.716
1.09	0.06	0.017	0.634

Tabella 10. *Table (J)* per il disco attuatore.

#### 4.1.2.b Geometria del disco

Si definiscono, in seguito alla scelta del *body force propeller method*, i seguenti parametri:

- **Raggio interno** del disco = 0.01 m. In tal modo si compenetra il disco con il mozzo al fine di evitare fenomeni di ricircolo;
- **Raggio esterno** del disco = 0.11 m. Pari al raggio dell'elica in oggetto;
- **Spessore** del disco = 0.05 m. Questo valore è stato definito in seguito a una serie di step di simulazione fatti per verificare l'ottenimento del corretto coefficiente d'avanzo,  $J = 0.847$ , impostato per la simulazione e con il quale si definisce la velocità del flusso proveniente dall'*Inlet*. Lo spessore e la posizione del piano di calcolo delle velocità indotte, come si vedrà in seguito, sono parametri fondamentali per una corretta implementazione del modello;
- **Origine del disco** = [0.2 m, 0.0 m, 0.0 m]. Coincidente con l'origine del *Virtual Disk CSys 1* definito sopra.
- **Sistema di riferimento** a cui esso è associato. Nel nostro caso si è deciso di associare il disco al sistema di riferimento che ruota con la rotazione del pod secondo

l'angolo di azimuth, questo per facilitare l'implementazione delle configurazioni ai vari angoli.

Inoltre, come **normale del disco**, direzione secondo cui esprime la spinta, si è scelto  $\{1.0, 0.0, 0.0\}$ .

In questo modo ad ogni angolo di azimuth il disco esprimerà spinta nella direzione coincidente con quella dell'elica che c'era prima.

La definizione del sistema di riferimento a cui è associato il disco dev'essere fatta di pari passo con la definizione del *Virtual Disk CSys 1*, i due sistemi devono avere la stessa origine.

#### **4.1.2.c Distribuzione radiale di spinta e coppia**

Si è scelto di assegnare a  $T_p$  e  $Q_p$  lo stesso tipo di distribuzione, ovvero quella di *Goldstein*.

#### **4.1.2.d Specifiche della distribuzione radiale di spinta e coppia**

Questo passaggio definisce il metodo con cui il programma distribuisce i valori di spinta e coppia radialmente sul disco in base a ciò che estraggono i piani da cui il programma ricava le velocità indotte sul disco.

Per tutti i metodi, la distribuzione radiale di coppia e spinta deve essere una funzione specifica della grandezza adimensionale  $r^*$  rappresentativa dello *span* del disco, ovvero il raggio della singola pala.

Nel nostro caso, come detto sopra, si è scelto come metodo una distribuzione secondo il **criterio di ottimizzazione di Goldstein** che imposta come punto di massimo della spinta il valore a 0.75% del raggio della singola pala.

Si rimanda alla guida del software i passaggi matematici che il software STAR-CCM+ esegue in maniera iterativa ad ogni step di simulazione per il calcolo di: T, Q e J sulla base del parametro di input assegnato.

Da notare il fatto che la procedura è iterativa, in quanto necessita della conoscenza del campo di moto che investe il disco, in termini di velocità indotte.



#### 4.1.2.e Inflow Specification

Ovvero come il software campiona/calcola le velocità a monte del disco, nel nostro caso si è scelto di definire un *Sampled Velocity Plane*. Tale piano rappresenta la zona di spazio dove vengono calcolate le velocità indotte.

Questo metodo colloca un piano a monte del *virtual disk* ed è sempre orientato secondo la stessa direzione normale al disco. Le componenti di velocità locali nel piano di afflusso, piano da cui arrivano le velocità campionate, sono mappate sulle celle con cui viene discretizzato il disco ad ogni iterazione. Con questa opzione, la velocità ad ogni cella è usata per calcolare i valori locali di  $K_{Tp}$  e  $K_{Qp}$ . Una volta “catturata” la velocità campionata in questo modo non è mediata ma è usata essa stessa per calcolare il coefficiente d’avanzo locale  $J$  per tutte le celle che compongono il *virtual disk*. In seguito a questo, l’influenza del campo di velocità localmente sull’elica è calcolato meglio.

Per definire il *sampled velocity plane* è necessario definire l’offset in termini di distanza dall’origine del *virtual disk*. Si consiglia un offset tra l’1% e il 10% del diametro del *virtual disk*; nel nostro caso si è assunto pari a 0.002 m.

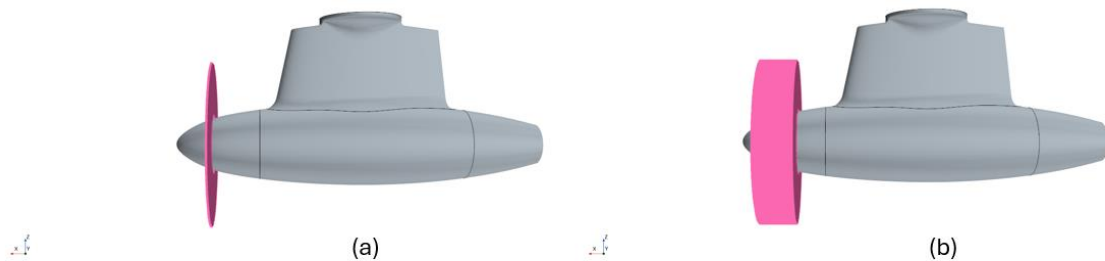


Figura 36. *Sampled Velocity Plane* (a) e *Virtual disk* (b) nel piano  $Y = 0$ .

#### 4.1.2.f Scelta del parametro di input

Si è scelto come parametro di input il numero di giri  $n$  pari a 15 rps in accordo con quanto assunto per tutte le simulazioni complete anche di elica condotte.

Definito  $n$ , il programma, in seguito al calcolo delle velocità indotte, calcolerà spinta, coppia e coefficiente d’avanzo e seguendo il criterio di ottimizzazione di *Goldstein* la distribuzione assiale, radiale e tangenziale delle forze espresse dal disco.

Una volta modellato il disco, sono state effettuate delle simulazioni a numero di giri e coefficiente d'avanzo rispettivamente pari a 15 rps e a 0.847. Le simulazioni sono state condotte per angoli di azimuth da  $0^\circ$  a  $360^\circ$  con intervallo pari a  $30^\circ$  per un totale di dodici simulazioni; tutte avviate con la sotto-soluzione MRF e poi convertite per ottenere la reale soluzione Non-Stazionaria.

In figura 37 si può osservare il campo di velocità in direzione x sul disco e in corrispondenza del *Sampled Velocity Plane*.

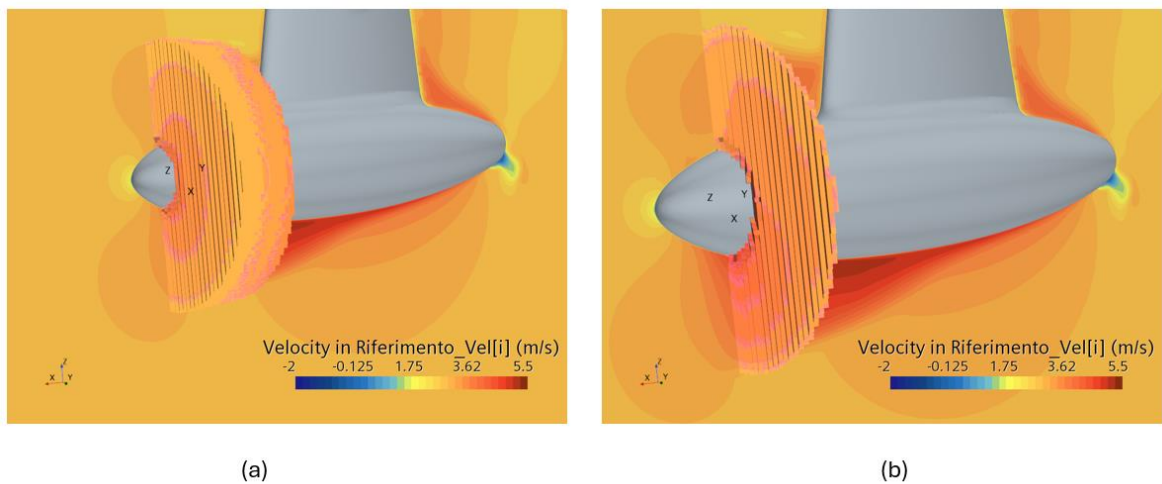


Figura 37. Campo di velocità in direzione x sul disco (a) e sul *Sampled Velocity Plane* (b).

# Risultati

Illustrata precedentemente la metodologia e gli strumenti utilizzati per effettuare la campagna di simulazioni oggetto di questa tesi, in questo capitolo vengono riproposti i **risultati** ottenuti per ogni tipo di simulazione condotta.

Si osserva che le simulazioni numeriche effettuate si possono dividere nei seguenti gruppi:

- **Analisi di convergenza**, dove sono state effettuate delle simulazioni per valori di  $\psi$  **angolo di rotazione azimuthale del pod** pari a  $\{0^\circ; 45^\circ; 90^\circ\}$ , questo per una serie di mesh con numero di celle crescente (8 mesh per  $0^\circ$  e  $45^\circ$  e 6 mesh per  $90^\circ$ ) e data una configurazione di tipo *pull* della propulsione a  $J = 0.847$ ;
- **Analisi a  $\psi = 0^\circ$  in configurazione *Pull* e *Push***, dove per il singolo valore dell'angolo di azimuth  $0^\circ$  sono state effettuate delle simulazioni in configurazione sia *pull* che *push* per valori del coefficiente d'avanzo  $J$  pari a  $\{0.65; 0.75; 0.847; 0.9; 1.00\}$  per un valore di base size pari a 0.18 m, ottenuto dall'analisi di convergenza;
- **Analisi in configurazione *Pull***, dove sono state effettuate delle simulazioni per valori de **coefficiente d'avanzo  $J$**  pari a  $\{0.75; 0.847; 0.90\}$ , per un valore di base size fissato pari a 0.18 m ottenuto dall'analisi di convergenza, per valori di  $\psi$  da  $0^\circ$  a  $360^\circ$  con intervallo di  $\psi$  pari a  $30^\circ$  in configurazione *pull*;
- **Analisi in configurazione *Push***, dove sono state effettuate delle simulazioni per valori di  $\psi$  da  $0^\circ$  a  $360^\circ$  con intervallo di  $\psi$  pari a  $30^\circ$  in configurazione *push* per un unico valore del coefficiente d'avanzo  $J = 0.847$  al valore di base size fissato pari a 0.18 m, ottenuto dall'analisi di convergenza.
- **Analisi delle azioni sulla struttura del Pod**, dove sono state effettuate delle simulazioni per valori di  $\psi$  da  $0^\circ$  a  $360^\circ$ , con intervallo di  $\psi$  pari a  $30^\circ$ , considerando la sola struttura del pod costituita da gondola e piede. Questo per  $J = 0.847$  e un valore di base size fissato pari a 0.18 m.
- **Analisi delle prestazioni del modello con *Virtual Disk***, dove sono state effettuate delle simulazioni per valori di  $\psi$  da  $0^\circ$  a  $360^\circ$ , con intervallo di  $\psi$  pari a  $30^\circ$ , considerando di posizionare al posto dell'elica un disco attuatore di diametro coincidente con quello dell'elica a  $n = 15$  rps.

I risultati vengono presentati in termini di:

- **Coefficienti adimensionali mediati sull'ultimo giro dell'elica**, per effettuare il confronto diretto numerico con i risultati sperimentali ai quali si vuole tendere e per evidenziare le differenze tra le diverse configurazioni, per esempio tra *pull* e *push* a parità di un determinato J.

I coefficienti sono:  $K_{TP}$ ,  $K_{FYP}$ ,  $K_{FZP}$ ,  $K_{QP}$ ,  $K_{Tx}$ ,  $K_{Ty}$ ,  $K_{Tz}$  e  $K_{Mz}$ . Dove  $K_{TP}$ ,  $K_{FYP}$ ,  $K_{FZP}$  e  $K_{QP}$  sono presi nel sistema di riferimento ruotato, mentre  $K_{Tx}$ ,  $K_{Ty}$ ,  $K_{Tz}$  e  $K_{Mz}$  sono presi nel riferimento fisso. Questo al variare dell'angolo di azimuth, del coefficiente d'avanzo e del valore della base size (e del numero di celle), per quanto riguarda l'analisi di convergenza.

- **Valori caratteristici del campo di moto generato dalle diverse simulazioni**, dove, fissato uno dei tre parametri, si mette in luce la differenza al variare degli altri due in termini di parametri chiave del campo di moto fluido. Quali velocità e campo di pressione;
- **Curve di  $K_{TP}$  e  $K_{QP}$  per  $\psi = 0^\circ$  in configurazione *Pull* e *Push***, dove, considerando un valore di  $\psi$  pari a  $0^\circ$ , si rappresenta l'andamento dei coefficienti di spinta e di coppia nelle due configurazioni propulsive, confrontandoli con i valori sperimentali noti;
- **Storie temporali dei coefficienti relativi all'elica**, dove, fissato il coefficiente d'avanzo, si mette in luce il comportamento pseudo-periodico delle forze espresse dall'elica nel tempo;
- **Storie temporali dei coefficienti relativi alla singola pala**, dove, ai diversi valori del coefficiente d'avanzo, si mettono in luce le differenze in termini di forze adimensionalizzate negli ultimi giro di rotazione di essa.

I risultati ottenuti nelle simulazioni vengono confrontati con i risultati sperimentali forniti dall'analisi di Heinke et al. (2004) [6]. Per quanto riguarda le grandezze misurate lungo l'asse y (componente espressa dall'elica e componente della risultante sulla struttura del pod) e per la coppia  $Q_p$  espressa dall'elica si ricorda che i valori estratti dal paper, riportati in questo elaborato, sono stati cambiati di segno a causa del sistema di riferimento non destrorso impiegato per le prove in vasca.

# 1. Analisi di convergenza

## 1.1 Validazione della mesh e del modello

Come detto sopra, in questo paragrafo si illustrano in forma tabulare i risultati ottenuti dalle simulazioni effettuate diminuendo la base size della mesh per i tre diversi angoli di rotazione della struttura completa del pod, a un coefficiente d'avanzo  $J$  pari a 0.847 e numero di giri dell'elica pari a 15 rps, considerando una configurazione propulsiva di tipo *Pull* (elica a proravia).

Si può notare come ogni simulazione condotta riporti il numero di celle generate in seguito alla creazione della mesh.

I risultati sono proposti in termini di coefficienti adimensionali mediati sull'ultimo giro di rotazione dell'elica.

### 1.1.1 Coefficienti per $\psi = 0^\circ$

Per  $\psi = 0^\circ$  sono state effettuate delle simulazioni considerando otto base size diverse:

$$b. s. = \{0.12; 0.14; 0.16; 0.18; 0.20; 0.22; 0.25; 0.30\}$$

Si riportano in tabella 11 e 12 i risultati prima effettuati per la sotto-simulazione MRF e poi per la sotto-simulazione Non-Stazionaria. Quest'ultima è quella che simula realmente il problema. Da notare che i segni di  $K_{FYP}$ ,  $K_{Ty}$  e  $K_{QP}$ , ottenuti durante le simulazioni CFD, sono stati invertiti per facilitare il confronto visivo coi risultati ottenuti dalle analisi sperimentali di Heinke [6]. Questo in seguito alla discordanza tra i sistemi di riferimento dovuta all'impiego di una terna non destrorsa nei risultati sperimentali in vasca.

### 1.1.1.a Caso MRF

DATO SPERIMENTALE		K_Tp	K_F_Yp	K_F_Zp	K_Q
		0.182	0.077	-0.069	0.035
DATO CFD $\psi = 0^\circ$					
N°CELLE	base size [m]	K_Tp_elica_rot	K_F_Yp	K_F_Zp	K_Qp_elica
14186288	0.12	0.184	0.007	-0.013	0.037
9364080	0.14	0.184	0.008	-0.014	0.038
6595829	0.16	0.184	0.008	-0.014	-
4937344	0.18	0.184	0.009	-0.015	-
3795114	0.2	0.184	0.009	-0.015	-
3035536	0.22	0.184	0.009	-0.014	-
2273173	0.25	0.183	0.009	-0.015	-
1545077	0.3	0.184	0.008	-0.014	-

DATO SPERIMENTALE		K_Tx	K_Ty	K_Tz	K_Mz
		0.1616	-0.0272	-0.0085	-0.0198
DATO CFD $\psi = 0^\circ$					
N°CELLE	base size [m]	K_Tx	K_Ty	K_Tz	K_Mz
14186288	0.120	0.162	0.037	-0.045	-0.016
9364080	0.140	0.159	0.020	-0.042	-0.014
6595829	0.160	0.161	0.031	-0.044	-0.015
4937344	0.180	0.158	0.016	-0.042	-0.014
3795114	0.200	0.159	0.020	-0.042	-0.014
3035536	0.220	0.158	0.019	-0.042	-0.014
2273173	0.250	0.157	0.016	-0.042	-0.014
1545077	0.300	0.159	0.028	-0.044	-0.015

Tabella 11. Coefficienti MRF a  $\psi = 0^\circ$  a  $J = 0.847$ .

Si può osservare che per quasi la totalità dei coefficienti, le differenze a zero gradi di angolo di azimuth, in termini di coefficienti rappresentativi delle azioni, siano dell'ordine di  $10^{-2}$  tra valore ottenuto sperimentalmente in vasca e valore ottenuto mediante CFD.

Questo soprattutto in termini di spinta e di coppia espressi dall'elica anche per un numero di celle relativamente basso pari a un milione e mezzo (base size pari a 0.3 m).

### 1.1.1.b Caso Non Stazionario

DATO SPERIMENTALE		K_Tp	K_F_Yp	K_F_Zp	K_Q
		0.182	0.077	-0.069	0.035
DATO CFD $\psi = 0^\circ$					
N°CELLE	base size [m]	K_Tp_elica_rot	K_F_Yp	K_F_Zp	K_Q_elica
14186288	0.12	0.184	0.013	-0.019	0.038
9364080	0.14	0.185	0.014	-0.018	0.038
6595829	0.16	0.185	0.013	-0.019	0.038
4937344	0.18	0.185	0.015	-0.018	0.038
3795114	0.2	0.185	0.014	-0.019	0.038
3035536	0.22	0.185	0.014	-0.019	0.038
2273173	0.25	0.185	0.015	-0.019	0.038
1545077	0.3	0.185	0.014	-0.019	0.038

DATO SPERIMENTALE		K_Tx	K_Ty	K_Tz	K_Mz
		0.162	-0.027	-0.009	-0.020
DATO CFD $\psi = 0^\circ$					
N°CELLE	base size [m]	K_Tx	K_Ty	K_Tz	K_Mz
14186288	0.12	0.162	0.029	-0.043	-0.019
9364080	0.14	0.160	0.015	-0.041	-0.018
6595829	0.16	0.161	0.023	-0.042	-0.019
4937344	0.18	0.159	0.014	-0.041	-0.018
3795114	0.2	0.160	0.019	-0.042	-0.018
3035536	0.22	0.159	0.016	-0.041	-0.018
2273173	0.25	0.158	0.015	-0.041	-0.018
1545077	0.3	0.159	0.018	-0.041	-0.018

Tabella 12. Coefficienti caso Non Stazionario a  $\psi = 0^\circ$  a  $J = 0.847$ .

Un comportamento analogo dei coefficienti adimensionali mediati si può osservare anche per la sotto-simulazione Non-Stazionaria.

Il modello MRF a  $0^\circ$  di angolo di azimuth rimane pertanto relativamente accurato e, ciò nonostante, una complessità di calcolo nella risoluzione delle equazioni minore.

### 1.1.2 Coefficienti per $\psi = 45^\circ$

Per  $\psi = 45^\circ$  sono state effettuate delle simulazioni considerando otto base size diverse:

$$b.s. = \{0.12; 0.14; 0.16; 0.18; 0.20; 0.22; 0.25; 0.30\}$$

Si riportano in tabella 13 e 14 i risultati prima effettuati per la sotto-simulazione MRF e poi per la sotto-simulazione Non-Stazionaria. Quest'ultima è quella che simula realmente il problema.

### 1.1.2.a Caso MRF

DATO SPERIMENTALE		K_Tp	K_F_Yp	K_F_Zp	K_Q
		0.419	0.628	-0.370	0.069
DATO CFD $\psi = 45^\circ$					
N°CELLE	base size [m]	K_Tp_elica_rot	K_F_Yp	K_F_Zp	K_Qp_elica
14240664	0.12	0.447	-0.031	-0.171	0.075
9441848	0.14	0.444	-0.030	-0.176	0.075
6684272	0.16	0.440	-0.031	-0.174	-
5005049	0.18	0.435	-0.031	-0.179	-
3825826	0.2	0.435	-0.034	-0.179	-
3077382	0.22	0.435	-0.035	-0.179	-
2304094	0.25	0.436	-0.036	-0.180	-
1564735	0.3	0.444	-0.045	-0.182	-

DATO SPERIMENTALE		K_Tx	K_Ty	K_Tz	K_Mz
		-0.199	0.757	-0.386	0.308
DATO CFD $\psi = 45^\circ$					
N°CELLE	base size [m]	K_Tx	K_Ty	K_Tz	K_Mz
14240664	0.120	0.167	0.531	-0.229	0.047
9441848	0.140	0.161	0.532	-0.233	0.050
6684272	0.160	0.161	0.526	-0.227	0.050
5005049	0.180	0.168	0.508	-0.220	0.050
3825826	0.200	0.174	0.500	-0.215	0.052
3077382	0.220	0.178	0.498	-0.212	0.046
2304094	0.250	0.174	0.501	-0.208	0.050
1564735	0.300	0.182	0.492	-0.198	0.036

Tabella 13. Coefficienti MRF a  $\psi = 45^\circ$  a  $J = 0.847$ .

### 1.1.2.b Caso Non Stazionario

DATO SPERIMENTALE		K_Tp	K_F_Yp	K_F_Zp	K_Q
		0.419	0.628	-0.370	0.069
DATO CFD $\psi = 45^\circ$					
N°CELLE	base size	K_Tp_elica_rot	K_F_Yp	K_F_Zp	K_Q_elica
14240664	0.12	0.423	0.324	0.135	0.074
9441848	0.14	0.424	0.326	0.133	0.074
6684272	0.16	0.423	0.327	0.134	0.071
5005049	0.18	0.420	0.327	0.138	0.071
3825826	0.2	0.421	0.325	0.136	0.071
3077382	0.22	0.421	0.327	0.137	0.071
2304094	0.25	0.421	0.327	0.136	0.071
1564735	0.3	0.421	0.328	0.137	0.071



DATO SPERIMENTALE		K_Tx	K_Ty	K_Tz	K_Mz
		-0.199	0.757	-0.386	0.308
DATO CFD $\psi = 45^\circ$					
N°CELLE	base size [m]	K_Tx	K_Ty	K_Tz	K_Mz
14240664	0.12	-0.194	0.781	-0.448	0.128
9441848	0.14	-0.185	0.770	-0.448	0.130
6684272	0.16	-0.198	0.785	-0.451	0.129
5005049	0.18	-0.194	0.785	-0.448	0.133
3825826	0.2	-0.156	0.781	-0.424	0.143
3077382	0.22	-0.173	0.797	-0.431	0.140
2304094	0.25	-0.158	0.786	-0.432	0.147
1564735	0.3	-0.181	0.798	-0.437	0.141

Tabella 14. Coefficienti caso Non Stazionario a  $\psi = 45^\circ$  a  $J = 0.847$ .

### 1.1.3 Coefficienti per $\psi = 90^\circ$

Per  $\psi = 90^\circ$  sono state effettuate delle simulazioni considerando sei base size diverse:

$$b.s. = \{0.16; 0.18; 0.20; 0.22; 0.25; 0.30\}$$

Si riportano in tabella 15 e 16 i risultati prima effettuati per la sotto-simulazione MRF e poi per la sotto-simulazione Non-Stazionaria. Quest'ultima è quella che simula realmente il problema.

#### 1.1.3.a Caso MRF

DATO SPERIMENTALE		K_Tp	K_F_Yp	K_F_Zp
		0.647	0.613	-0.310
DATO CFD $\psi = 90^\circ$				
N°CELLE	base size [m]	K_Tp_elica_rot	K_F_Yp	K_F_Zp
6576106	0.16	0.540	0.073	-0.035
4930371	0.18	0.465	0.066	-0.023
3794751	0.2	0.418	0.055	-0.025
3022037	0.22	0.394	0.069	-0.034
2262957	0.25	0.369	0.053	-0.024
1557244	0.3	0.361	0.058	-0.017

DATO SPERIMENTALE		K_Tx	K_Ty	K_Tz	K_Mz
		-0.811	0.791	-0.348	0.360
DATO CFD $\psi = 90^\circ$					
N°CELLE	base size [m]	K_Tx	K_Ty	K_Tz	K_Mz
6576106	0.16	-0.567	0.578	-0.319	0.044
4930371	0.18	-0.538	0.493	-0.320	0.034
3794751	0.2	-0.517	0.446	-0.334	0.018
3022037	0.22	-0.519	0.422	-0.333	0.015
2262957	0.25	-0.502	0.390	-0.342	-0.001
1557244	0.3	-0.504	0.379	-0.344	0.002

Tabella 15. Coefficienti MRF a  $\psi = 90^\circ$  a  $J = 0.847$ .

### 1.1.3.b Caso Non Stazionario

DATO SPERIMENTALE		K_Tp	K_F_Yp	K_F_Zp	K_Q
		0.647	0.613	-0.310	0.103
DATO CFD $\psi = 90^\circ$					
N°CELLE	base size [m]	K_Tp_elica_rot	K_F_Yp	K_F_Zp	K_Q_elica
6576106	0.16	0.602	0.274	0.079	0.097
4930371	0.18	0.619	0.271	0.089	0.099
3794751	0.2	0.652	0.276	0.095	0.104
3022037	0.22	0.661	0.271	0.092	0.105
2262957	0.25	0.661	0.257	0.059	0.103
1557244	0.3	0.666	0.255	0.066	0.100

DATO SPERIMENTALE		K_Tx	K_Ty	K_Tz	K_Mz
		-0.811	0.791	-0.348	0.360
DATO CFD $\psi = 90^\circ$					
N°CELLE	base size [m]	K_Tx	K_Ty	K_Tz	K_Mz
6576106	0.16	-0.655	0.678	-0.367	0.051
4930371	0.18	-0.641	0.681	-0.344	0.055
3794751	0.2	-0.667	0.711	-0.345	0.065
3022037	0.22	-0.643	0.716	-0.333	0.057
2262957	0.25	-0.614	0.723	-0.393	0.017
1557244	0.3	-0.621	0.724	-0.399	0.022

Tabella 16. Coefficienti caso Non Stazionario a  $\psi = 90^\circ$  a  $J = 0.847$ .

Si può osservare che, nonostante per il caso ad angolo di azimuth pari a  $90^\circ$  non siano state prese in considerazione base size pari a 0.12 e 0.14 m per le simulazioni, il modello definito risulta robusto ad angoli di funzionamento del pod usuali come  $0^\circ$  e  $45^\circ$ .

Anche a  $90^\circ$  si può comunque vedere che la spinta e la coppia esercitate dall'elica, parametri chiave per conoscere il funzionamento di quest'ultima, abbiano valori simili a quelli ottenuti negli esperimenti.

Si riscontrano alcune divergenze per quanto riguarda il comportamento in termini di forze lungo  $y$ , lungo  $z$  e soprattutto in termini di momento rispetto a tale asse. Questo principalmente per angolo di azimuth pari a  $90^\circ$ ; ciò è abbastanza normale a causa del regime del campo di moto, caratterizzato da elevate fluttuazioni e vorticità, che si instaura in tale configurazione.

## 1.2 Analisi di convergenza e scelta della mesh

Attraverso il confronto tra i coefficienti ottenuti nelle prove in vasca e tra quelli ottenuti mediante simulazioni CFD si è assunta la validità del modello adottato in questa tesi.

Nel seguente paragrafo si illustrano, invece, i risultati, in termini di curve estrapolate ai minimi quadrati, frutto dell'analisi di convergenza vera e propria.

Ovvero, delle curve estrapolate secondo polinomi di grado  $\geq 1$  che evidenziano il valore del coefficiente adimensionale  $i$ -esimo al tendere all'infinito del numero di celle della mesh.

Questo per i tre valori di  $\psi = \{0^\circ; 45^\circ; 90^\circ\}$  e considerando solo il risultato delle simulazioni Non Stazionarie. Si riportano, inoltre, gli errori delle simulazioni condotte in funzione del valore del coefficiente  $i$ -esimo per  $N \rightarrow \infty$ .

Si ricorda che  $N = \sqrt[3]{\frac{\text{Numero massimo di celle}}{\text{Numero locale di celle}}}$  ed è di conseguenza adimensionale.

## 1.2.1 Curve estrapolate per $\psi = 0^\circ$

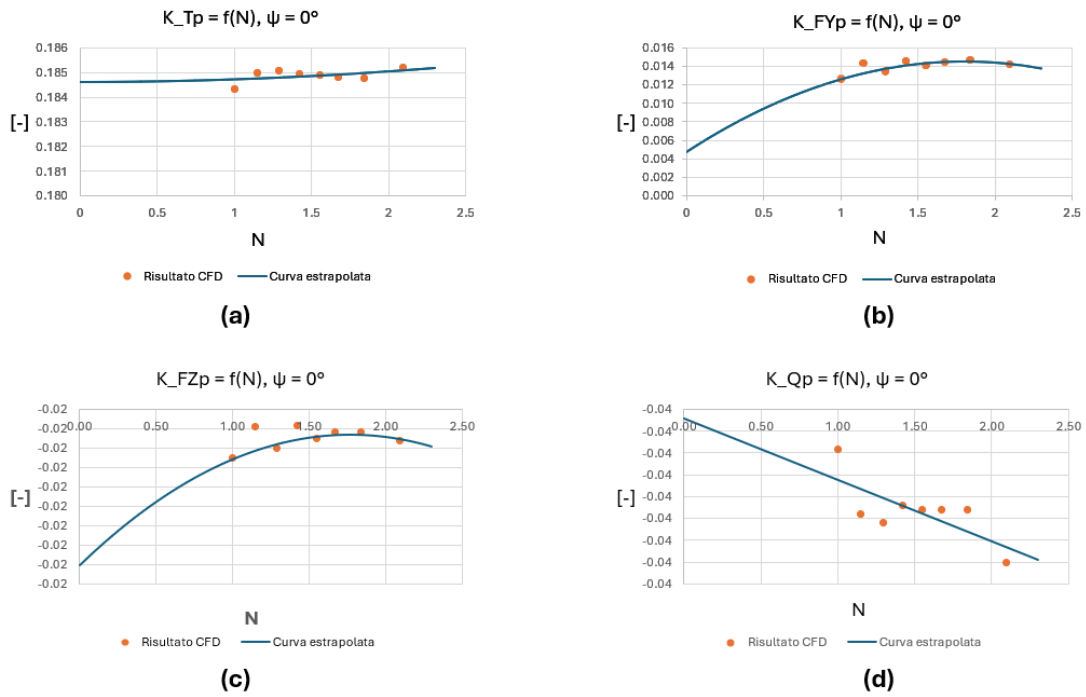


Figura 38. Curve estrapolate dei coefficienti adimensionali relativi all'elica per  $\psi = 0^\circ$ .

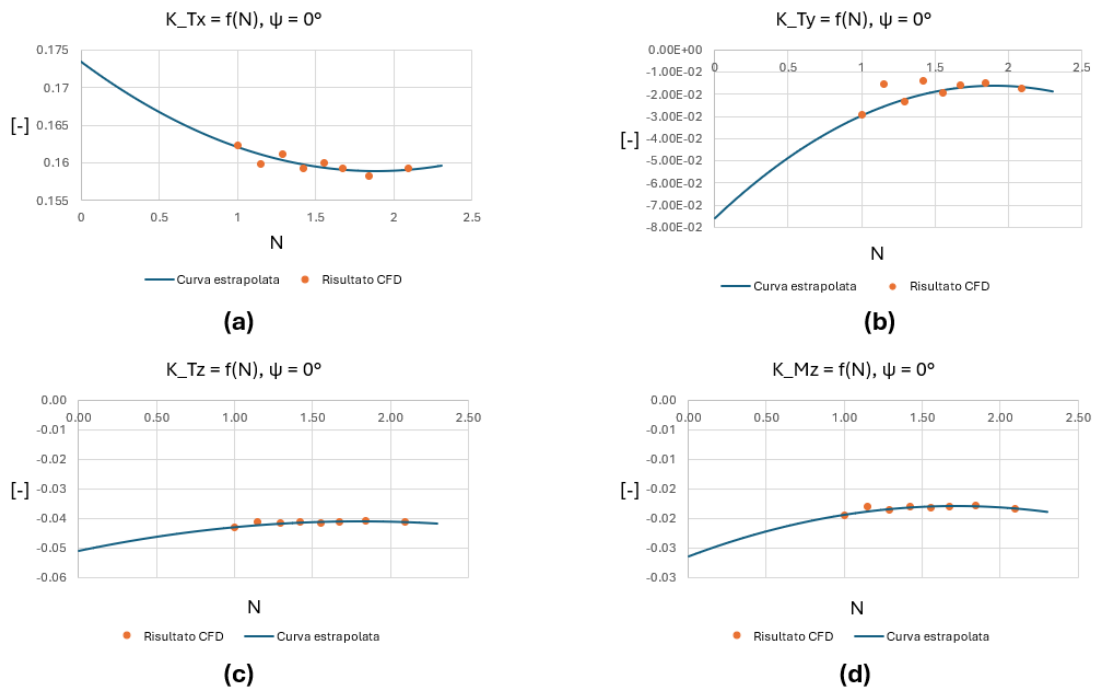


Figura 39. Curve estrapolate dei coefficienti adimensionali relativi al supporto del pod per  $\psi = 0^\circ$ .

Qui di seguito si riportano in forma tabulare gli errori compiuti dalle otto mesh sulla curva estrapolata, in funzione del numero di celle della simulazione. Questo per alcuni dei coefficienti calcolati, ovvero:  $K_{TP}$ ,  $K_{QP}$ ,  $K_{Tx}$ .

base size	N°CELLE	N	K_Tp	K_Tp(N=∞) - K_Tp(N)
0.12	14186288	1.00	0.184	0.0026
0.14	9364080	1.15	0.185	0.0026
0.16	6595829	1.29	0.185	0.0026
0.18	4937344	1.42	0.185	0.0026
0.2	3795114	1.55	0.185	0.0026
0.22	3035536	1.67	0.185	0.0026
0.25	2273173	1.84	0.185	0.0026
0.3	1545077	2.09	0.185	0.0026

Tabella 17. Errore rispetto a  $N = \infty$  delle singole mesh per  $K_{TP}$  a  $\psi = 0^\circ$ .

base size	N°CELLE	N	K_Tx	K_Tx(N=∞) - K_Tx(N)
0.12	14186288	1.00	0.16	0.01
0.14	9364080	1.15	0.16	0.01
0.16	6595829	1.29	0.16	0.01
0.18	4937344	1.42	0.16	0.01
0.2	3795114	1.55	0.16	0.01
0.22	3035536	1.67	0.16	0.01
0.25	2273173	1.84	0.16	0.01
0.3	1545077	2.09	0.16	0.01

Tabella 18. Errore rispetto a  $N = \infty$  delle singole mesh per  $K_{Tx}$  a  $\psi = 0^\circ$ .

base size	N°CELLE	N	K_Qp	K_Qp(N=∞) - K_Qp(N)
0.12	14186288	1.00	-0.04	0.001
0.14	9364080	1.15	-0.04	0.001
0.16	6595829	1.29	-0.04	0.001
0.18	4937344	1.42	-0.04	0.001
0.2	3795114	1.55	-0.04	0.001
0.22	3035536	1.67	-0.04	0.001
0.25	2273173	1.84	-0.04	0.001
0.3	1545077	2.09	-0.04	0.001

Tabella 19. Errore rispetto a  $N = \infty$  delle singole mesh per  $K_{QP}$  a  $\psi = 0^\circ$ .

Per quanto riguarda i restanti coefficienti il comportamento è analogo, ovvero: si evidenziano scarti dell'ordine di  $10^{-2}/10^{-3}$  tra il valore locale del coefficiente trovato mediante simulazione CFD e di quello ottenuto con la curva estrapolata per  $N = \infty$ .

## 1.2.2 Curve estrapolate per $\psi = 45^\circ$

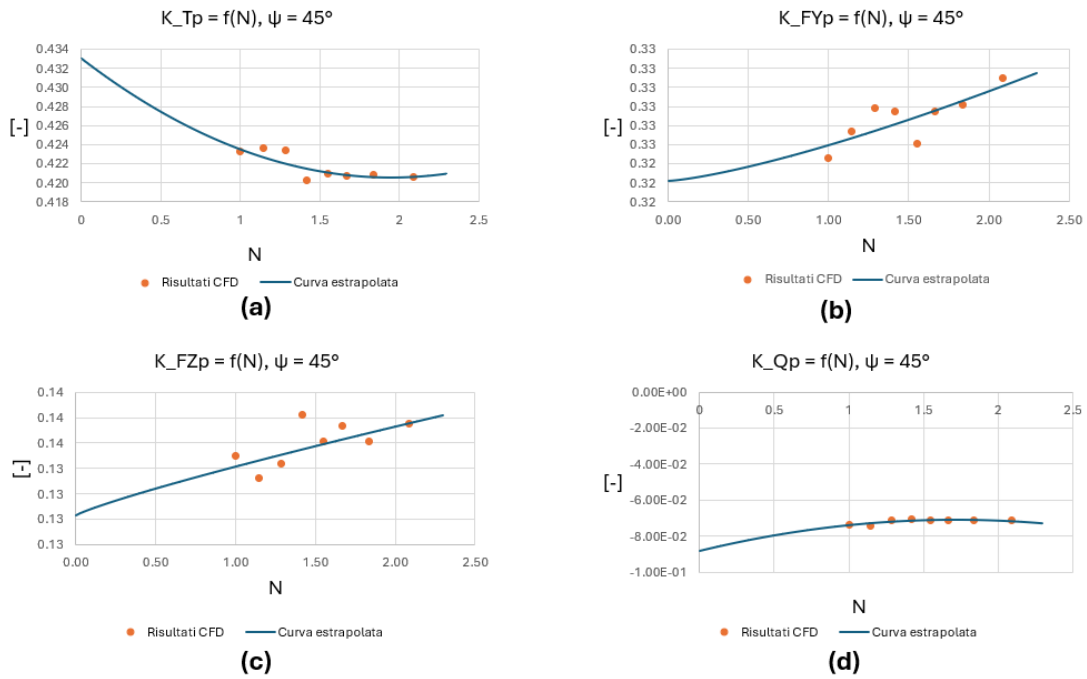


Figura 40. Curve estrapolate dei coefficienti adimensionali relativi all'elica per  $\psi = 45^\circ$ .

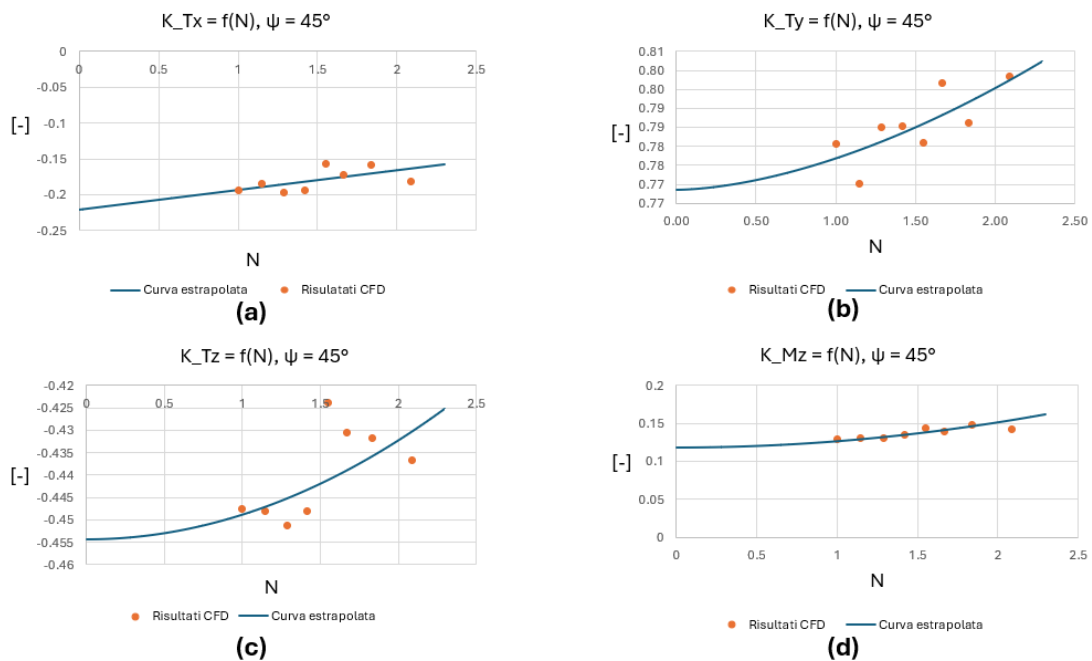


Figura 41. Curve estrapolate dei coefficienti adimensionali relativi al supporto del pod per  $\psi = 45^\circ$ .

Come per  $\psi = 0^\circ$  si riportano in forma tabulare gli errori compiuti dalle otto mesh sulla curva estrapolata, in funzione del numero di celle della simulazione. Questo per alcuni dei coefficienti calcolati, ovvero:  $K_{TP}$ ,  $K_{QP}$ ,  $K_{Tx}$ .

base size	N°CELLE	N	K_Tp	K_Tp(N=∞) - K_Tp(N)
0.12	14240664	1.00	0.423	0.0102
0.14	9441848	1.15	0.424	0.0102
0.16	6684272	1.29	0.423	0.0102
0.18	5005049	1.42	0.420	0.0102
0.2	3825826	1.55	0.421	0.0102
0.22	3077382	1.67	0.421	0.0102
0.25	2304094	1.84	0.421	0.0102
0.3	1564735	2.09	0.421	0.0102

Tabella 20. Errore rispetto a  $N = \infty$  delle singole mesh per  $K_{TP}$  a  $\psi = 45^\circ$ .

base size	N°CELLE	N	K_Tx	K_Tx(N=∞) - K_Tx(N)
0.12	14240664	1.00	-0.07	0.04
0.14	9441848	1.15	-0.07	0.05
0.16	6684272	1.29	-0.07	0.05
0.18	5005049	1.42	-0.07	0.05
0.2	3825826	1.55	-0.07	0.05
0.22	3077382	1.67	-0.07	0.05
0.25	2304094	1.84	-0.07	0.05
0.3	1564735	2.09	-0.07	0.05

Tabella 21. Errore rispetto a  $N = \infty$  delle singole mesh per  $K_{Tx}$  a  $\psi = 45^\circ$ .

base size	N°CELLE	N	K_Qp	K_Qp(N=∞) - K_Qp(N)
0.12	14240664	1.00	-0.19	0.12
0.14	9441848	1.15	-0.19	0.12
0.16	6684272	1.29	-0.20	0.12
0.18	5005049	1.42	-0.19	0.12
0.2	3825826	1.55	-0.16	0.12
0.22	3077382	1.67	-0.17	0.12
0.25	2304094	1.84	-0.16	0.12
0.3	1564735	2.09	-0.18	0.12

Tabella 22. Errore rispetto a  $N = \infty$  delle singole mesh per  $K_{QP}$  a  $\psi = 45^\circ$ .

### 1.2.3 Curve estrapolate per $\psi = 90^\circ$

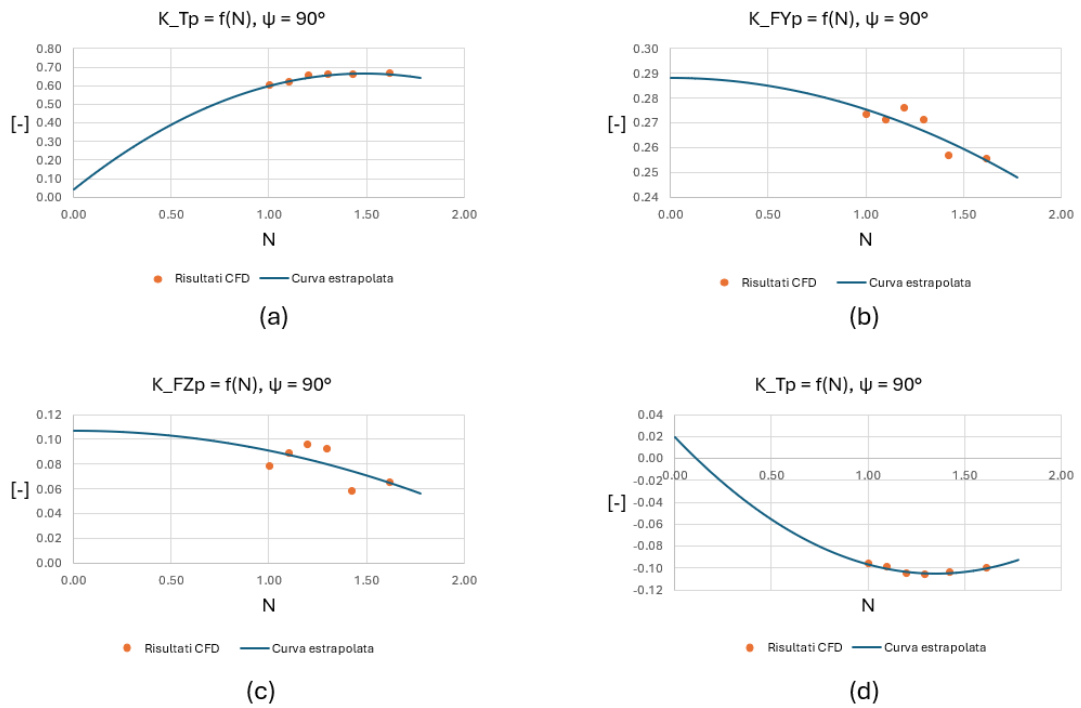


Figura 42. Curve estrapolate dei coefficienti adimensionali relativi all'elica per  $\psi = 90^\circ$ .

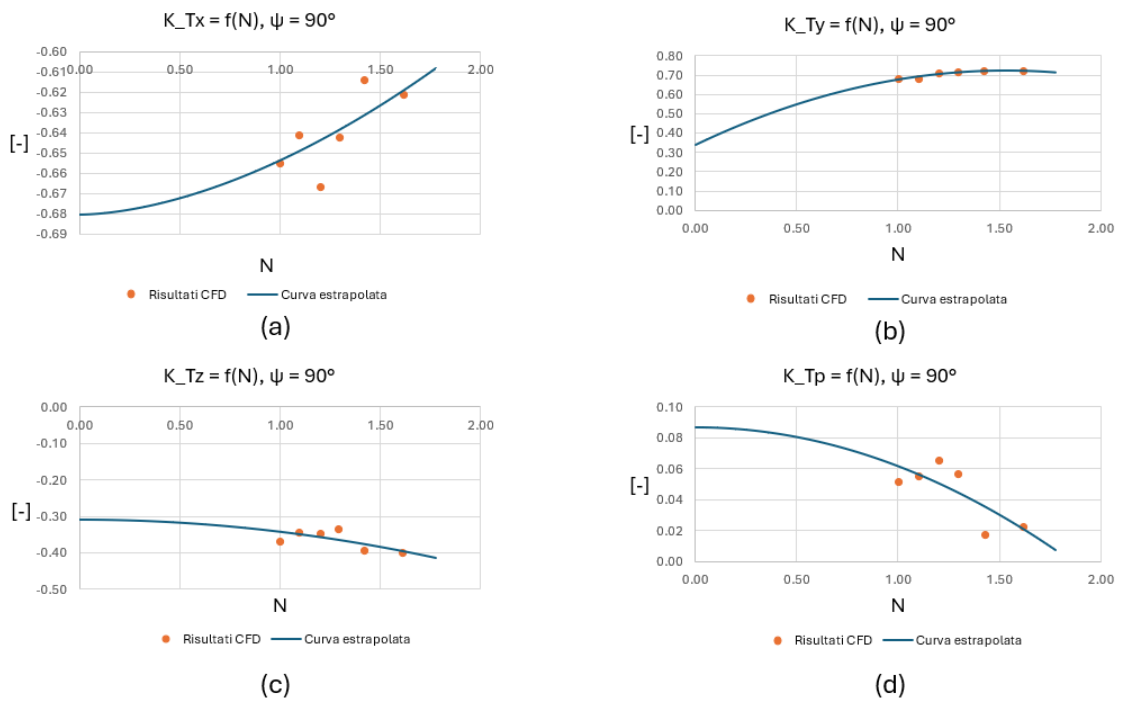


Figura 43. Curve estrapolate dei coefficienti adimensionali relativi al supporto del pod per  $\psi = 90^\circ$ .



Come per  $\psi = 0^\circ$  e  $45^\circ$  si riportano in forma tabulare gli errori compiuti dalle sei mesh sulla curva estrapolata, in funzione del numero di celle della simulazione. Questo per alcuni dei coefficienti calcolati, ovvero:  $K_{TP}$ ,  $K_{QP}$ ,  $K_{Tx}$ .

base size	N°CELLE	N	K_Tp	K_Tp(N=∞) - K_Tp(N)
0.16	6576106	1.00	0.60	1.68
0.18	4930371	1.10	0.62	1.77
0.2	3794751	1.20	0.65	1.82
0.22	3022037	1.30	0.66	1.86
0.25	2262957	1.43	0.66	1.89
0.3	1557244	1.62	0.67	1.87

Tabella 23. Errore rispetto a  $N = \infty$  delle singole mesh per  $K_{TP}$  a  $\psi = 90^\circ$ .

base size	N°CELLE	N	K_Tx	K_Tx(N=∞) - K_Tx(N)
0.16	6576106	1.00	-0.66	0.15
0.18	4930371	1.10	-0.64	0.16
0.2	3794751	1.20	-0.67	0.16
0.22	3022037	1.30	-0.64	0.16
0.25	2262957	1.43	-0.61	0.16
0.3	1557244	1.62	-0.62	0.16

Tabella 24. Errore rispetto a  $N = \infty$  delle singole mesh per  $K_{Tx}$  a  $\psi = 90^\circ$ .

base size	N°CELLE	N	K_Qp	K_Qp(N=∞) - K_Qp(N)
0.16	6576106	1.00	-0.10	0.35
0.18	4930371	1.10	-0.10	0.36
0.2	3794751	1.20	-0.10	0.37
0.22	3022037	1.30	-0.11	0.37
0.25	2262957	1.43	-0.10	0.37
0.3	1557244	1.62	-0.10	0.36

Tabella 25. Errore rispetto a  $N = \infty$  delle singole mesh per  $K_{Qp}$  a  $\psi = 90^\circ$ .

Si osserva che, rispetto ai casi per  $\psi = 0^\circ$  e  $45^\circ$ , le differenze tra il valore per  $N = \infty$  e il valore locale del coefficiente  $i$ -esimo, ottenuto con le sei mesh utilizzate per lo studio del caso  $\psi = 90^\circ$ , sono maggiori. Ciò è dovuto alla maggior complessità del campo di moto fluido che si ha in tale configurazione.

Nonostante quest'ultimo aspetto si può osservare che il valore di base size di 0.18 [m] garantisce un numero di celle sufficientemente elevato per discretizzare al meglio il dominio computazionale e pertanto tale valore è quello scelto per la campagna di simulazioni successiva.

## 1.3 Valori caratteristici del campo di moto

### 1.3.1 $V_x$ e $C_p$ per $\psi = 0^\circ$

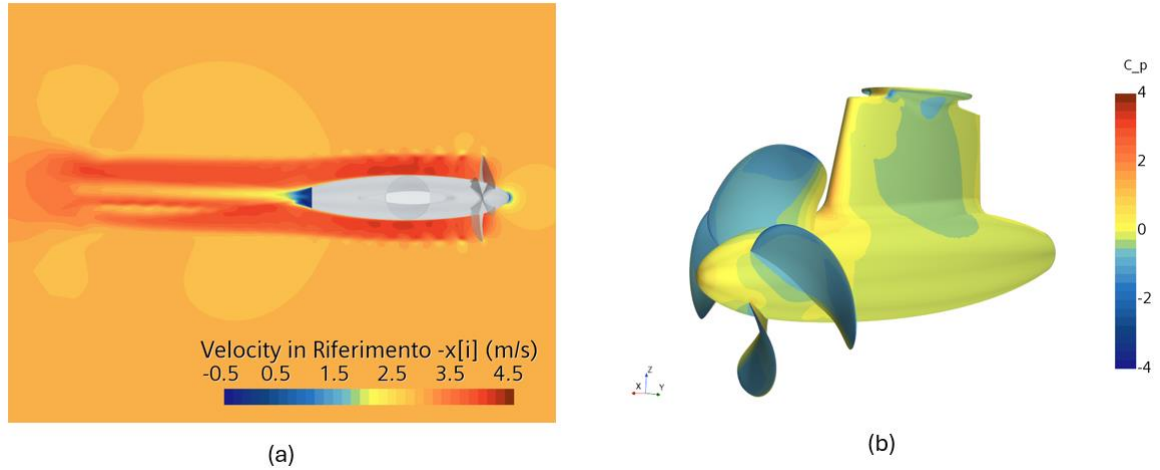


Figura 44. (a)  $V_x$  in  $Z = 0$ , (b)  $C_p$  sulla struttura completa per base size pari a 0.12 m.

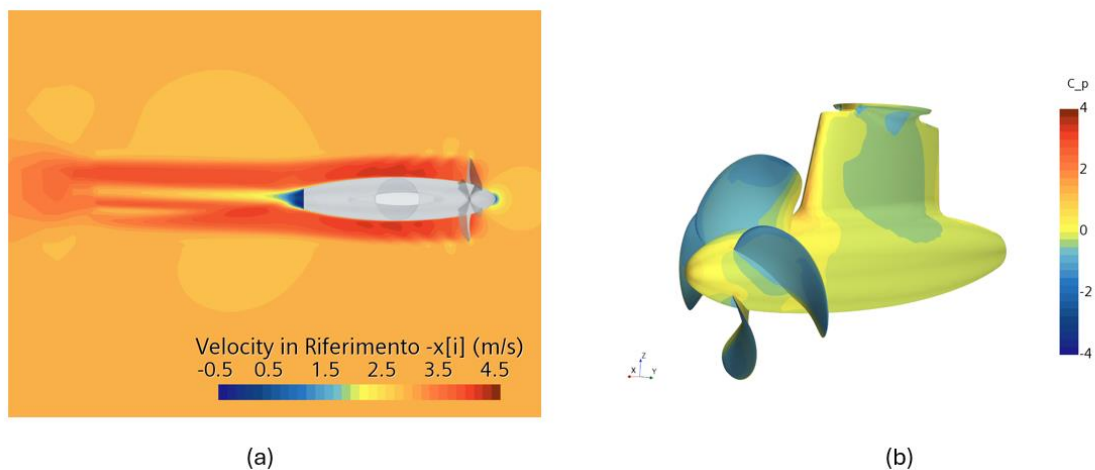


Figura 45. (a)  $V_x$  in  $Z = 0$ , (b)  $C_p$  sulla struttura completa per base size pari a 0.30 m.

In figura 44 e 45 si possono vedere i valori caratteristici del campo di moto per quanto riguarda: componente  $V_x$  del campo di velocità in un piano  $Z = 0$  e coefficiente adimensionale di pressione  $C_p$ .

Si può osservare che a  $0^\circ$  di angolo di azimuth non vi è grossa differenza tra una mesh con base size pari a 0.12 m e una con base size pari a 0.30 m.

### 1.3.1 $V_x$ e $C_p$ $\psi = 45^\circ$

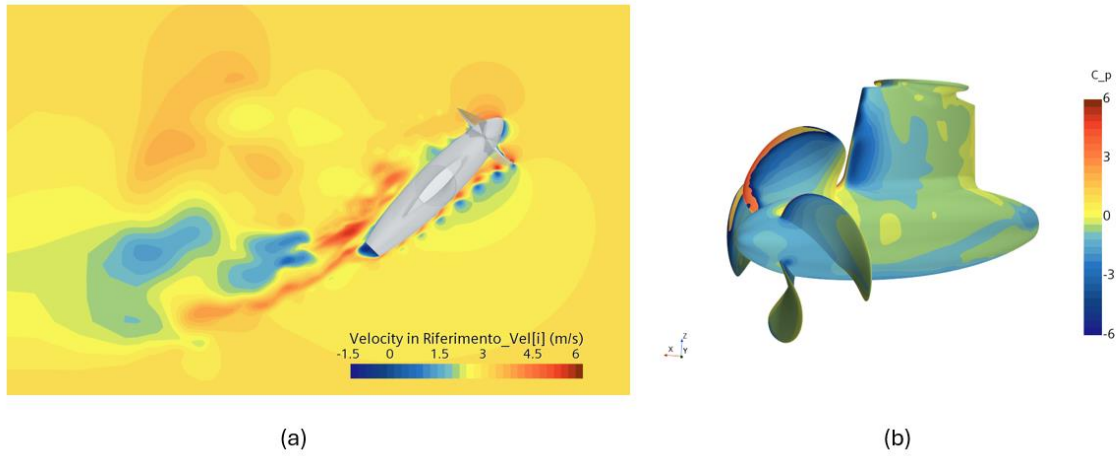


Figura 46. (a)  $V_x$  in  $Z = 0$ , (b)  $C_p$  sulla struttura completa per base size pari a 0.12 m.

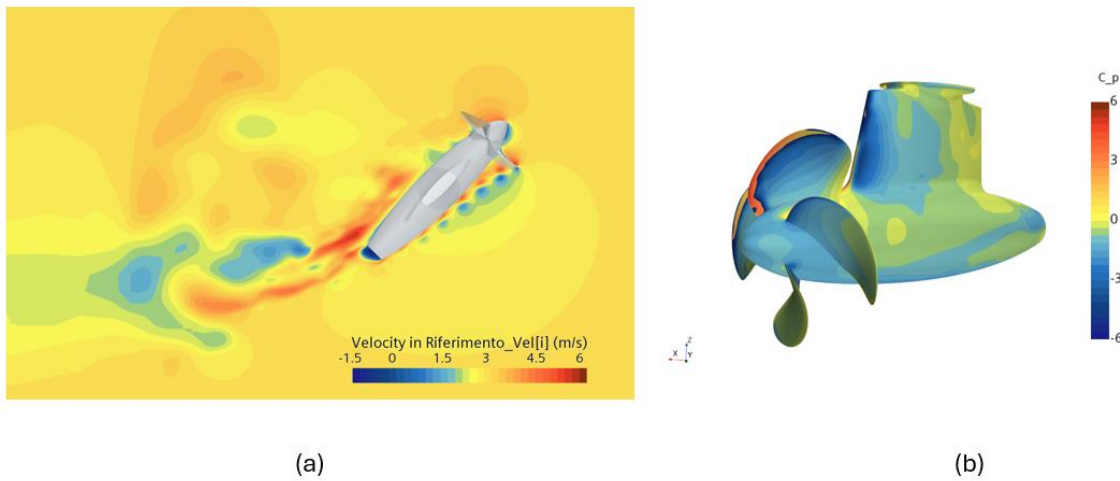


Figura 47. (a)  $V_x$  in  $Z = 0$ , (b)  $C_p$  sulla struttura completa per base size pari a 0.18 m.

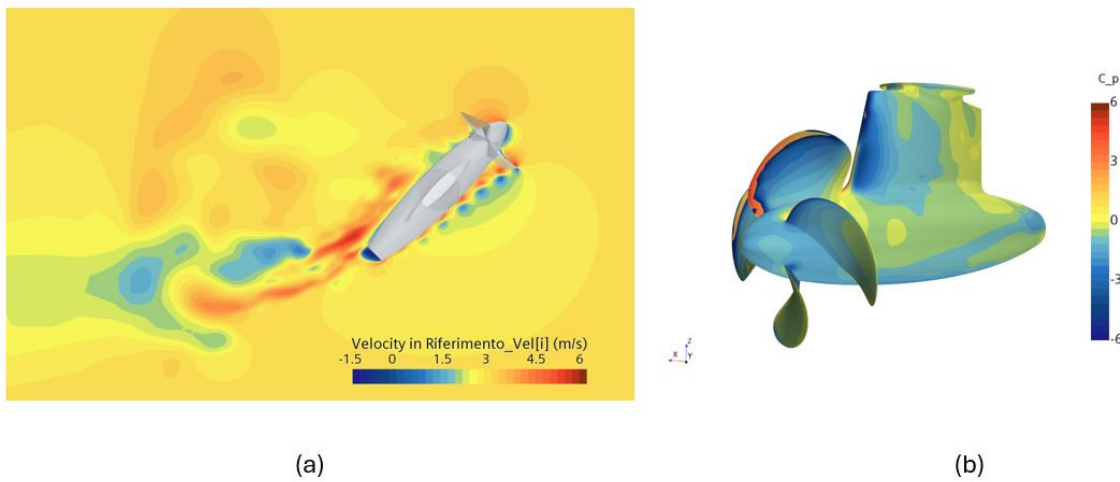


Figura 48. (a)  $V_x$  in  $Z = 0$ , (b)  $C_p$  sulla struttura completa per base size pari a 0.30 m.

### 1.3.1 $V_x$ e $C_p$ per $\psi = 90^\circ$

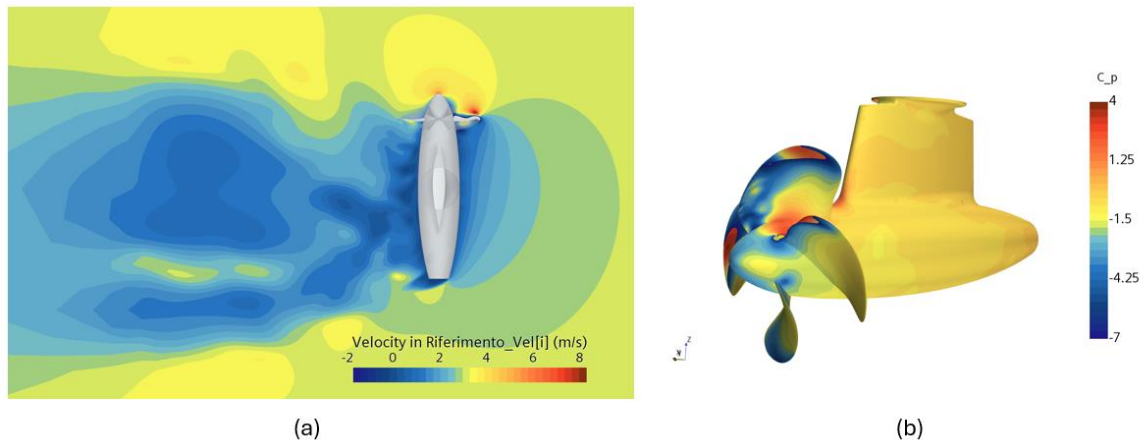


Figura 49. (a)  $V_x$  in  $Z = 0$ , (b)  $C_p$  sulla struttura completa per base size pari a 0.16 m.

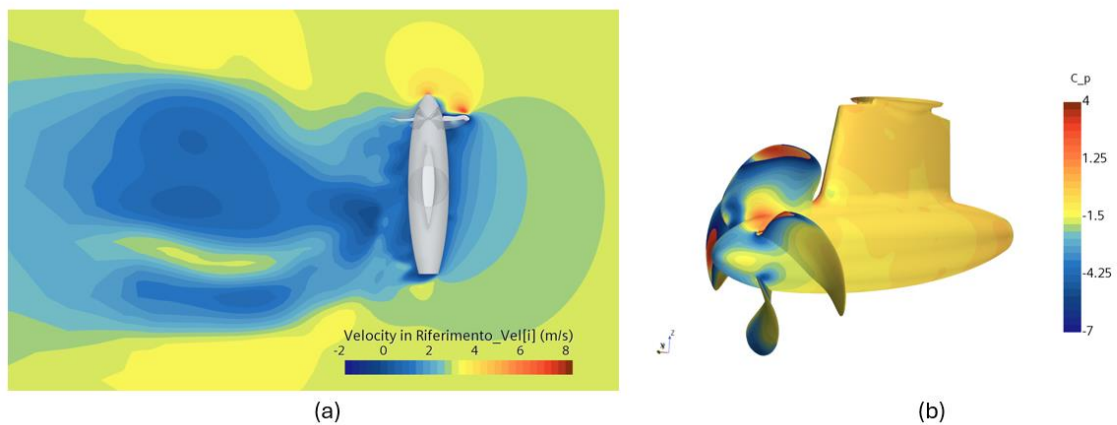


Figura 50. (a)  $V_x$  in  $Z = 0$ , (b)  $C_p$  sulla struttura completa per base size pari a 0.30 m.

Nelle figure soprastanti si può osservare come il campo di moto cambi in funzione della mesh. Sebbene apparentemente queste differenze non siano marcate a livello visivo, si può notare, come riportato nelle tabelle precedenti, che i coefficienti adimensionali rappresentativi delle grandezze in gioco cambino anche abbastanza sensibilmente. Questo soprattutto in configurazioni difficili da osservare come per angolo di azimuth pari a  $90^\circ$ .

## 2. Analisi a $\psi = 0^\circ$ in configurazione *Pull* e *Push*

Si illustrano in questo paragrafo i risultati, in termini di  $K_{TP}$  e  $K_{QP}$  mediati sull'ultimo giro di rotazione dell'elica, ottenuti da delle simulazioni caratterizzate da questi parametri:

- **Base size 0.18 m;**
- **$\psi = 0^\circ$ ;**
- In configurazione sia *Pull* che *Push*, considerando tutta la struttura completa del pod e per ogni caso, i seguenti valori del coefficiente d'avanzo J: 0.65, 0.75, 0.847, 0.90, 1.00.

Per ogni valore di J si riportano i valori di  $K_{TP}$  e  $K_{QP}$  ottenuti dalla sotto-soluzione MRF e dalla soluzione vera e propria Non-Stazionaria.

I valori ottenuti vengono poi confrontati con i risultati sperimentali di Heinke [6], ottenuti mediante la stessa configurazione propulsiva in oggetto.

### 2.1 Configurazione *Pull*

J	MRF			UNSTEADY		
	K_Tp	K_Qp	10*K_Qp	K_Tp	K_Qp	10*K_Qp
0.65	0.282	0.051	0.508	0.286	0.051	0.515
0.75	0.232	0.044	0.441	0.234	0.045	0.445
0.847	0.184	0.037	0.375	0.185	0.038	0.377
0.9	0.158	0.034	0.338	0.159	0.034	0.339
1	0.107	0.026	0.261	0.107	0.026	0.261

Tabella 26.  $K_{TP}$  e  $K_{QP}$  per  $\psi = 0^\circ$  in configurazione *Pull*.

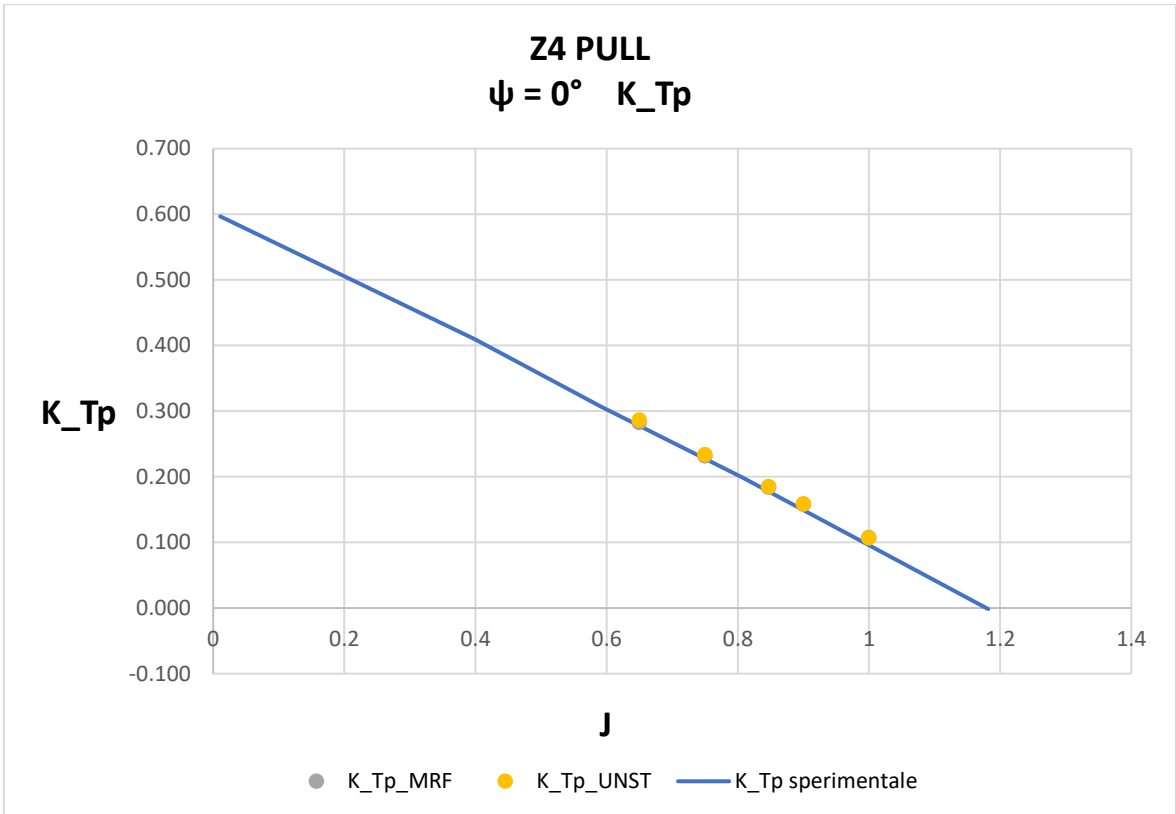


Grafico 1.  $K_{TP}$  per  $\psi = 0^\circ$  in configurazione *Pull* per base size pari a 0.18 m.

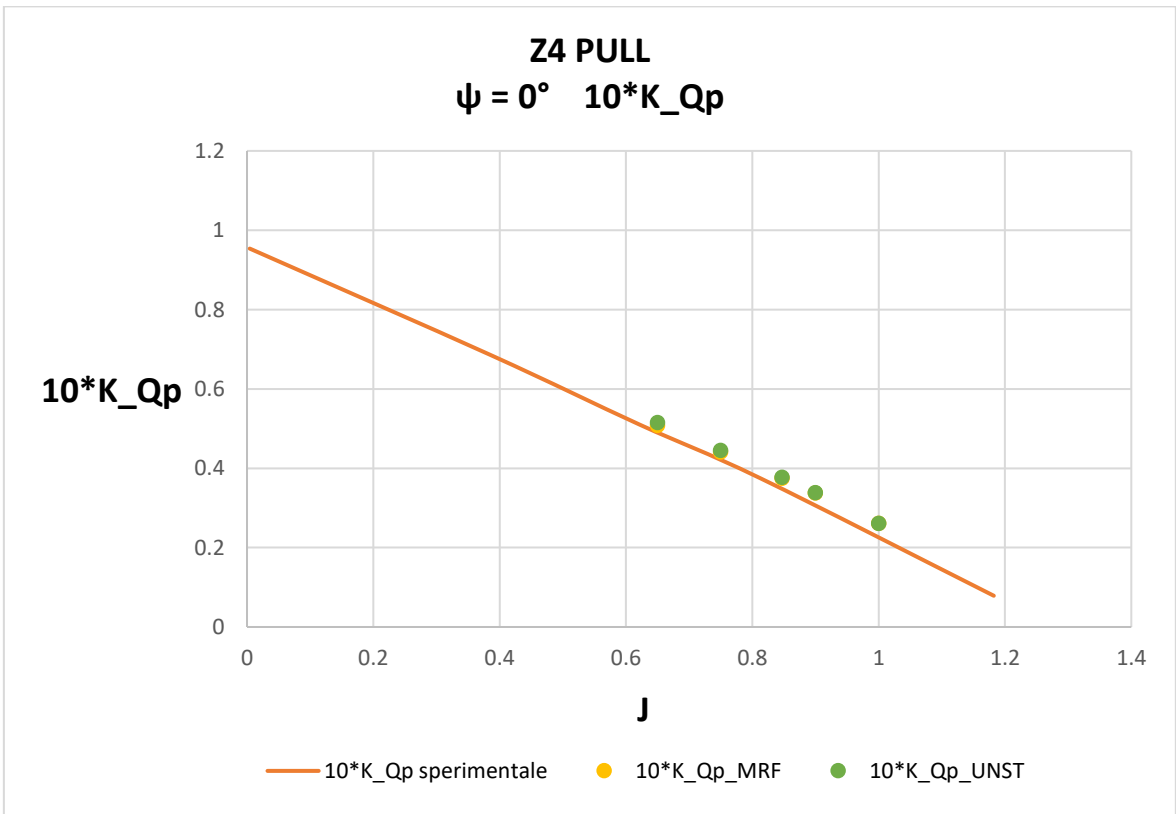


Grafico 2.  $10K_{QP}$  per  $\psi = 0^\circ$  in configurazione *Pull* per base size pari a 0.18 m.

## 2.2 Configurazione *Push*

J	MRF			UNSTEADY		
	K_Tp	K_Qp	10*K_Qp	K_Tp	K_Qp	10*K_Qp
0.65	0.2857	0.0520	0.5195	0.2940	0.0535	0.5348
0.75	0.2397	0.0458	0.4584	0.2460	0.0470	0.4704
0.847	0.1961	0.0398	0.3979	0.2009	0.0407	0.4075
0.9	0.1724	0.0363	0.3634	0.1764	0.0372	0.3716
1	0.1265	0.0294	0.2941	0.1295	0.0300	0.3003

Tabella 27.  $K_{TP}$  e  $K_{QP}$  per  $\psi = 0^\circ$  in configurazione *Push*.

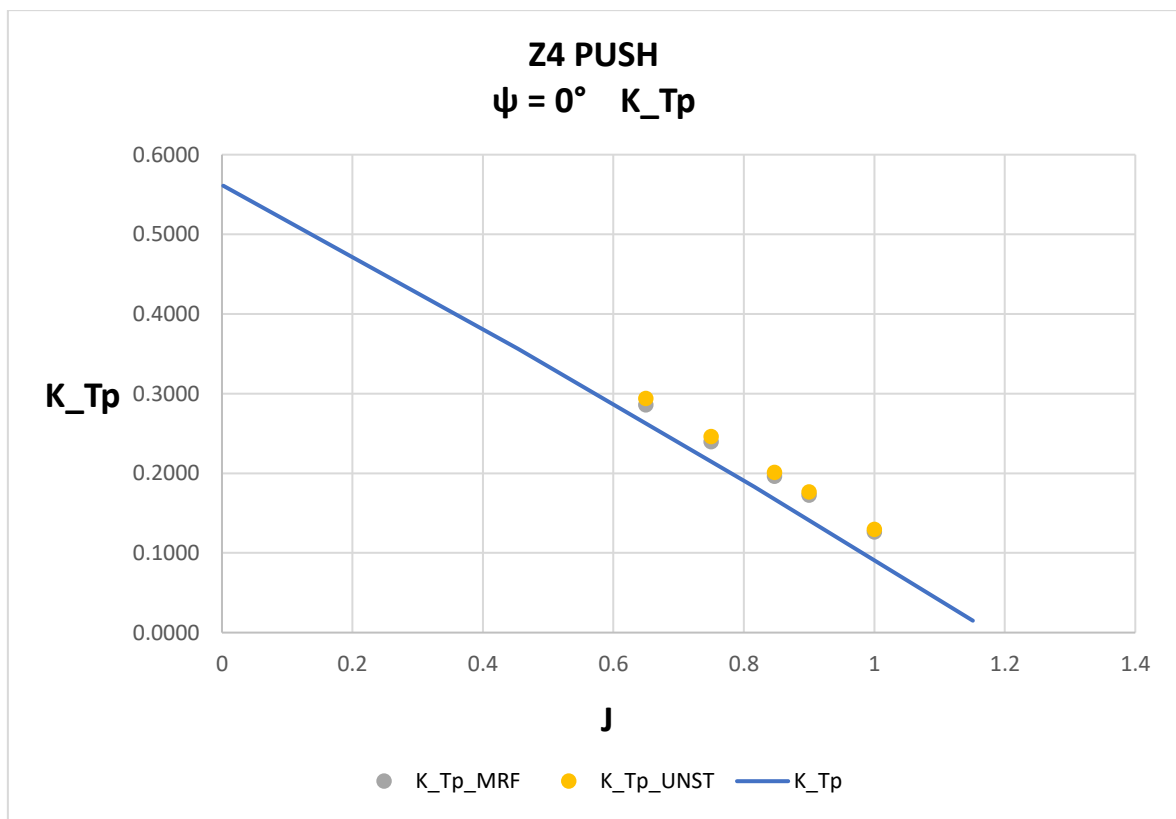


Grafico 3.  $K_{TP}$  per  $\psi = 0^\circ$  in configurazione *Push* per base size pari a 0.18 m.

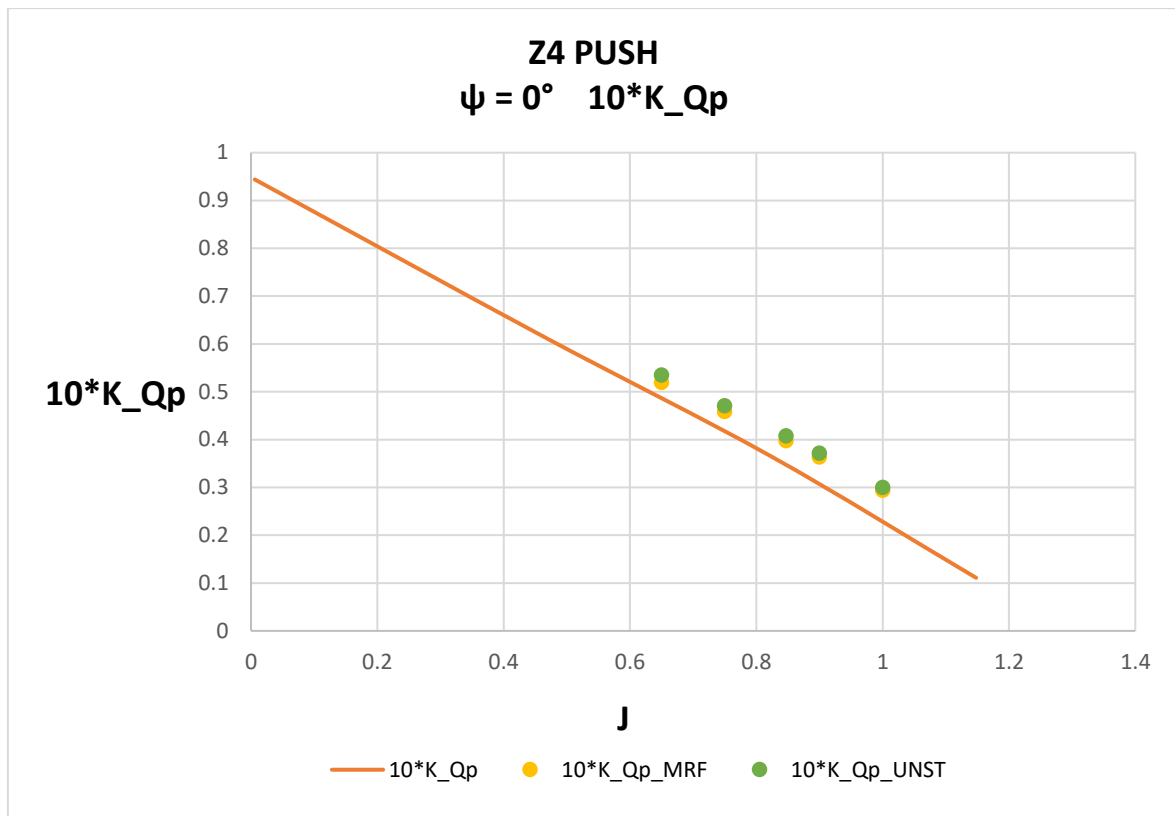


Grafico 4.  $10K_{QP}$  per  $\psi = 0^\circ$  in configurazione *Push* per base size pari a 0.18 m.

### 3. Analisi in configurazione *Pull*

In questo paragrafo vengono esposti alcuni dei risultati ottenuti dalla campagna di simulazioni fatta considerando la configurazione propulsiva di tipo *Pull* per tre valori del coefficiente d'avanzo  $J = \{0.75; 0.847; 0.90\}$ .

Questo considerando una base size pari a 0.18 m e per valori dell'angolo di azimuth  $\psi$  da  $0^\circ$  a  $360^\circ$  con intervallo pari a  $30^\circ$  tra simulazione e simulazione.

Le simulazioni condotte sono state effettuate impostando una sotto-simulazione MRF con 1080 iterazioni stazionarie e poi dopo cambiandola, impostando una simulazione di tipo non stazionario e caratterizzata da 16 giri di rotazione dell'elica (5760 iterazioni temporali di simulazione). Questo accorgimento è stato impostato al fine di migliorare la convergenza della soluzione, ricercando, il più possibile, la stabilità del campo di moto nelle sue grandezze caratteristiche.



### 3.1 Coefficienti adimensionali

I risultati vengono presentati in termini di coefficienti adimensionali  $K_{TP}$ ,  $K_{FYP}$ ,  $K_{FZP}$ ,  $K_{QP}$ ,  $K_{Tx}$ ,  $K_{Ty}$ ,  $K_{Tz}$  e  $K_{Mz}$ .

I valori sono i risultati ottenuti effettuando una media temporale sui valori ottenuti nell'ultimo giro di rotazione dell'elica nelle configurazioni ai diversi angoli di azimuth per il singolo valore del coefficiente d'avanzo e per quanto riguarda una **soluzione Non-Stazionaria**.

Questo per una base size pari a 0.18 m che ha portato a un numero di celle per ogni simulazione circa pari a cinque milioni. Si ricorda che i valori dei coefficienti rappresentativi delle componenti delle forze lungo l'asse y sono di segno opposto rispetto a quanto viene riportato nella pubblicazione di Heinke; questo in funzione del sistema di riferimento da loro adottato, caratterizzato da un asse y di segno opposto rispetto alla notazione da noi adottata.

#### 3.1.1 Simulazioni per $J = 0.75$

$\Psi$ [°]	K_Tp	K_F_Yp	K_F_Zp	K_Qp
0	0.2341	0.0088	-0.0118	0.0445
30	0.3284	0.2480	0.1059	0.0575
60	0.5640	0.2844	0.1280	0.0922
90	0.5658	0.2401	0.0741	0.0907
120	0.5715	0.0165	0.0742	0.0946
150	0.4090	-0.0277	0.0363	0.0719
180	0.3502	-0.0238	-0.0122	0.0638
210	0.5152	0.0971	-0.0725	0.0869
240	0.6656	-0.0314	-0.1199	0.1094
270	0.8000	-0.2227	-0.1450	0.1265
300	0.5726	-0.2425	-0.1598	0.0934
330	0.3252	-0.2281	-0.1306	0.0570
360	0.2341	0.0088	-0.0118	0.0445

Tabella 28. Coefficienti adimensionali relativi all'elica in configurazione *Pull*.

$\psi$ [°]	K_Tx	K_Ty	K_Tz	K_Mz
0	0.2059	-0.0201	-0.03918	-0.0192
30	0.0489	0.49414	-0.2651	0.1924
60	-0.3231	0.84759	-0.5136	0.3119
90	-0.5641	0.62779	-0.3079	0.2142
120	-0.6332	0.39631	-0.1054	-0.0169
150	-0.5415	0.0235	-0.02344	-0.0525
180	-0.4055	0.0504	0.01129	-0.0211
210	-0.6846	-0.0305	-0.12533	0.0210
240	-0.6660	-0.4971	-0.1785	-0.0912
270	-0.7641	-0.8680	-0.0606	-0.3380
300	-0.3309	-0.8563	-0.0534	-0.2801
330	0.0830	-0.5619	0.0233	-0.2268
360	0.2059	-0.0201	-0.03918	-0.0192

Tabella 29. Coefficienti adimensionali relativi alla struttura del pod in configurazione *Pull*.

### 3.1.2 Simulazioni per $J = 0.847$

$\psi$ [°]	K_Tp	K_F_Yp	K_F_Zp	K_Qp
0	0.1849	0.0143	-0.0186	0.0376
30	0.2937	0.3075	0.1222	0.0523
60	0.5702	0.3186	0.1339	0.0930
90	0.6160	0.2600	0.0874	0.0991
120	0.6413	0.0291	0.1360	0.1056
150	0.4337	-0.0179	0.0658	0.0756
180	0.4007	0.0010	0.0127	0.0720
210	0.4707	0.0543	-0.0498	0.0814
240	0.7612	-0.0095	-0.1279	0.1247
270	0.8694	-0.2183	-0.1544	0.1371
300	0.5768	-0.2708	-0.1752	0.0941
330	0.2897	-0.2754	-0.1601	0.0518
360	0.1849	0.0143	-0.0186	0.0376

Tabella 30. Coefficienti adimensionali relativi all'elica in configurazione *Pull*.

$\psi$ [°]	K_Tx	K_Ty	K_Tz	K_Mz
0	0.1596	-0.0175	-0.0416	-0.0174
30	-0.0124	0.5320	-0.2894	0.2206
60	-0.4344	0.9327	-0.6030	0.3512
90	-0.6504	0.6981	-0.3460	0.2626
120	-0.7187	0.4505	-0.1345	0.0182
150	-0.6305	-0.0508	-0.0198	-0.0479
180	-0.4556	0.0087	-0.0205	0.0055
210	-0.6933	0.0873	-0.1010	0.0531
240	-0.8131	-0.5412	-0.2270	-0.0800
270	-0.8708	-0.9316	-0.1344	-0.3651
300	-0.3839	-0.9051	-0.0788	-0.3371
330	0.0050	-0.5942	-0.0054	-0.2426
360	0.1596	-0.0175	-0.0416	-0.0174

Tabella 31. Coefficienti adimensionali relativi alla struttura del pod in configurazione *Pull*.

### 3.1.2 Simulazioni per $J = 0.90$

$\psi$ [°]	K_Tp	K_F_Yp	K_F_Zp	K_Qp
0	0.1585	0.0192	-0.0239	0.0339
30	0.2746	0.3480	0.1339	0.0495
60	0.5716	0.3364	0.1409	0.0932
90	0.6665	0.2665	0.1026	0.1066
120	0.6928	0.0353	0.1538	0.1145
150	0.4448	-0.0118	0.0703	0.0777
180	0.4270	-0.0056	-0.0021	0.0763
210	0.4928	0.0406	-0.0832	0.0845
240	0.8173	-0.0190	-0.1403	0.1337
270	0.9131	-0.2150	-0.1561	0.1439
300	0.5789	-0.2854	-0.1830	0.0944
330	0.2695	-0.3093	-0.1784	0.0488
360	0.1585	0.0192	-0.0239	0.0339

Tabella 32. Coefficienti adimensionali relativi all'elica in configurazione *Pull*.

$\psi$ [°]	K_Tx	K_Ty	K_Tz	K_Mz
0	0.1342	-0.0126	-0.04340	-0.0160
30	-0.0502	0.55957	-0.3009	0.23730
60	-0.4921	0.98377	-0.6537	0.38941
90	-0.7527	0.74233	-0.3937	0.29620
120	-0.7896	0.49169	-0.1472	0.02715
150	-0.6650	-0.0741	-0.04092	-0.0538
180	-0.4853	-0.0027	-0.02247	-0.0105
210	-0.7405	0.1085	-0.14543	0.0514
240	-0.8565	-0.5908	-0.2973	-0.0986
270	-0.9691	-0.9681	-0.1629	-0.3685
300	-0.4463	-0.9509	-0.1070	-0.3588
330	-0.0239	-0.6059	-0.0181	-0.2568
360	0.1342	-0.0126	-0.04340	-0.0160

Tabella 33. Coefficienti adimensionali relativi alla struttura del pod in configurazione *Pull*.

## 3.2 Confronto con i dati sperimentali

Vengono qui illustrati in formato grafico i risultati in termini di **coefficienti adimensionali**  $K_{TP}$ ,  $K_{FYP}$ ,  $K_{FZP}$ ,  $K_{QP}$ ,  $K_{Tx}$ ,  $K_{Ty}$ ,  $K_{Tz}$  e  $K_{Mz}$  al variare dell'angolo di azimuth, **mediati sull'ultimo giro di rotazione dell'elica** e, per quanto riguarda  $J = 0.847$  confrontati con i risultati sperimentali.

### 3.2.1 Coefficienti relativi all'elica

In questa sezione si riportano i grafici relativi alle forze ed alla coppia  $Q_p$ , adimensionalizzati, espressi dall'elica al variare dell'angolo di azimuth.

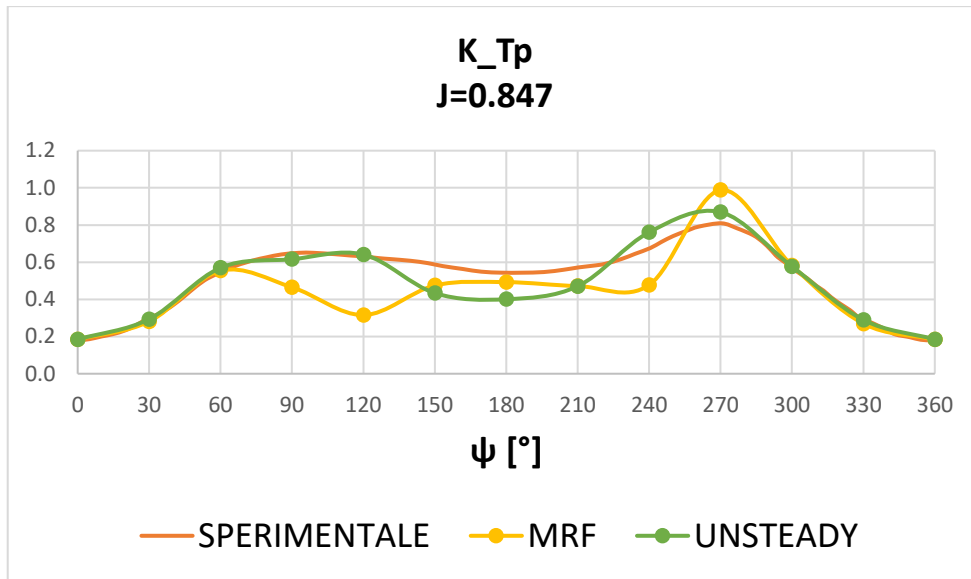


Grafico 5.  $K_{TP}$  per  $J = 0.847$ .

Si può osservare che anche per una rotazione del pod pari a +/- 120° la soluzione non stazionaria CFD prevede bene la spinta dell'elica.

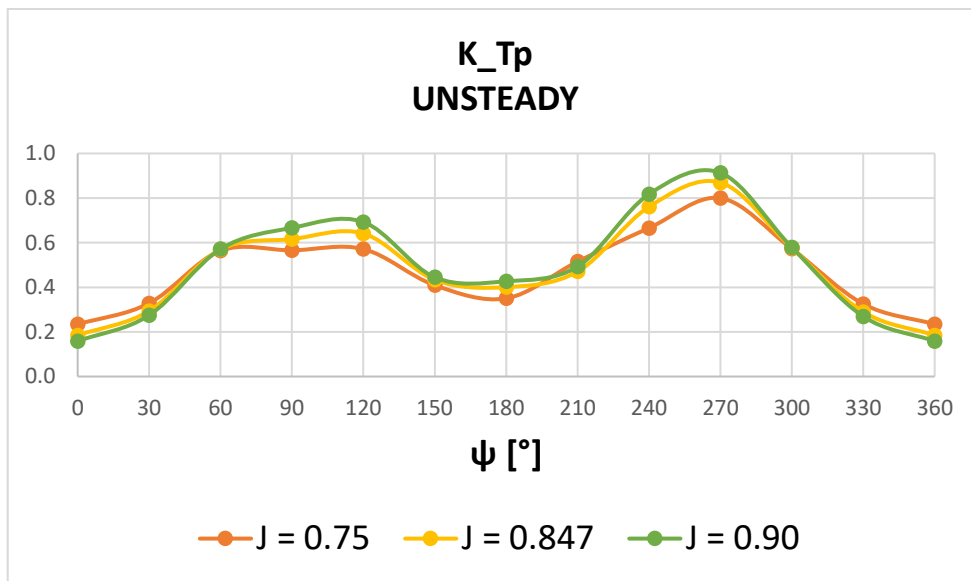


Grafico 6.  $K_{TP}$  per i tre J considerati.

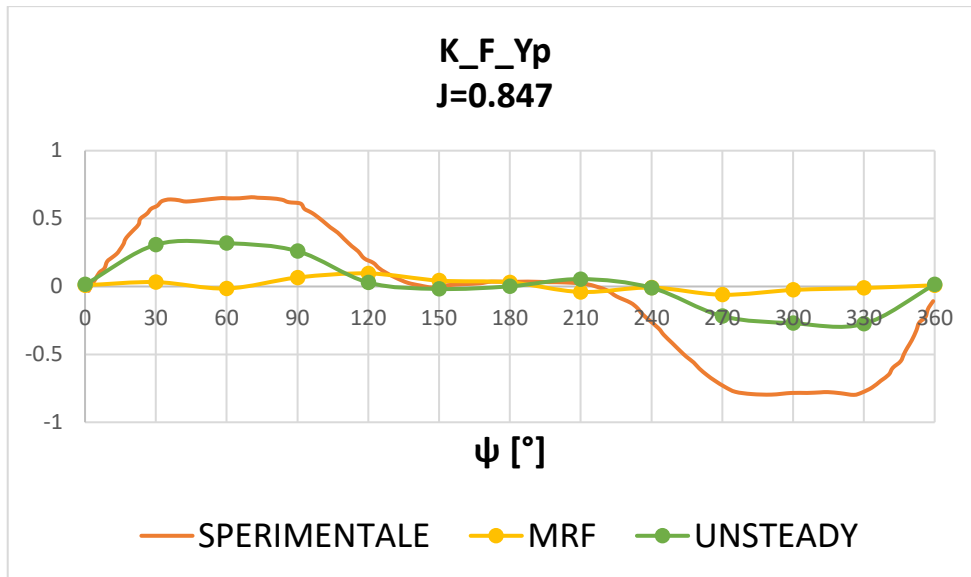


Grafico 7.  $K_{FYp}$  per  $J = 0.847$ .

La soluzione non stazionaria CFD prevede solamente l'andamento di  $K_{FZp}$  al variare dell'angolo di azimuth.

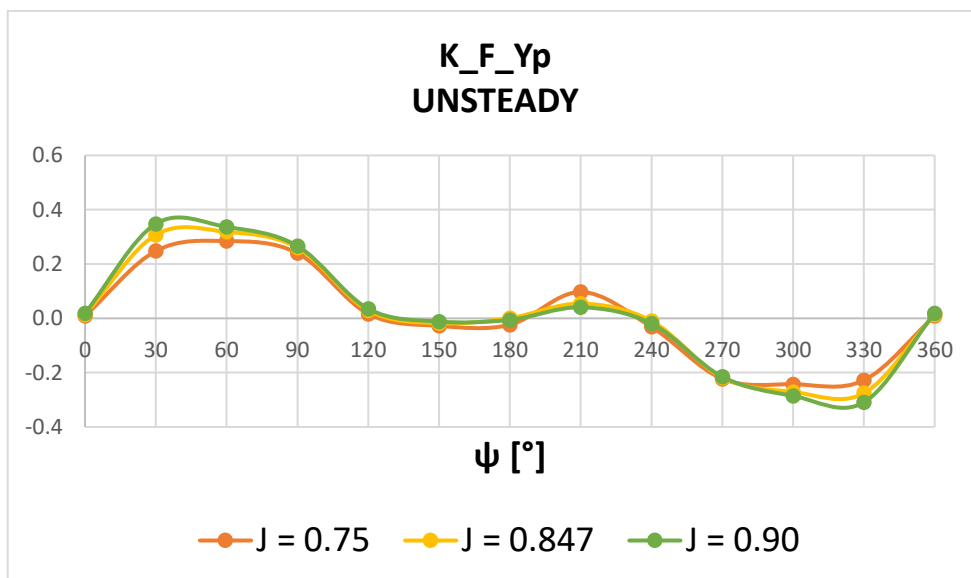


Grafico 8.  $K_{FYp}$  per i tre J considerati.

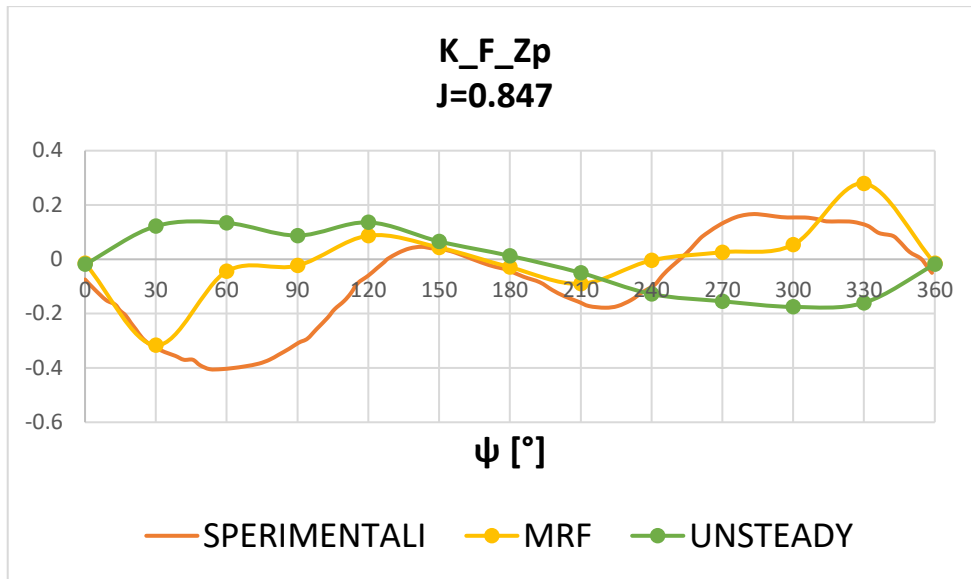


Grafico 9.  $K_{FZp}$  per  $J = 0.847$ .

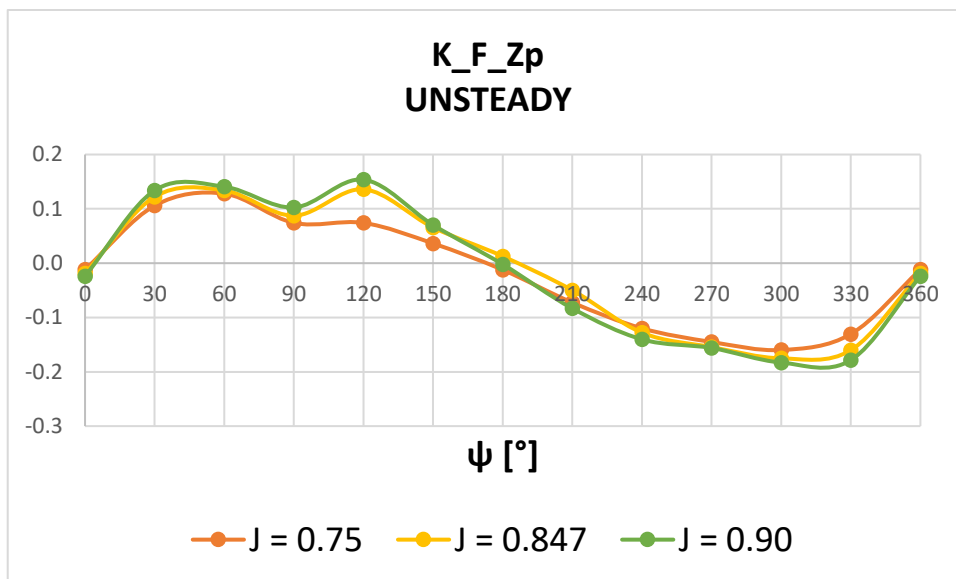


Grafico 10.  $K_{FZp}$  per i tre J considerati.

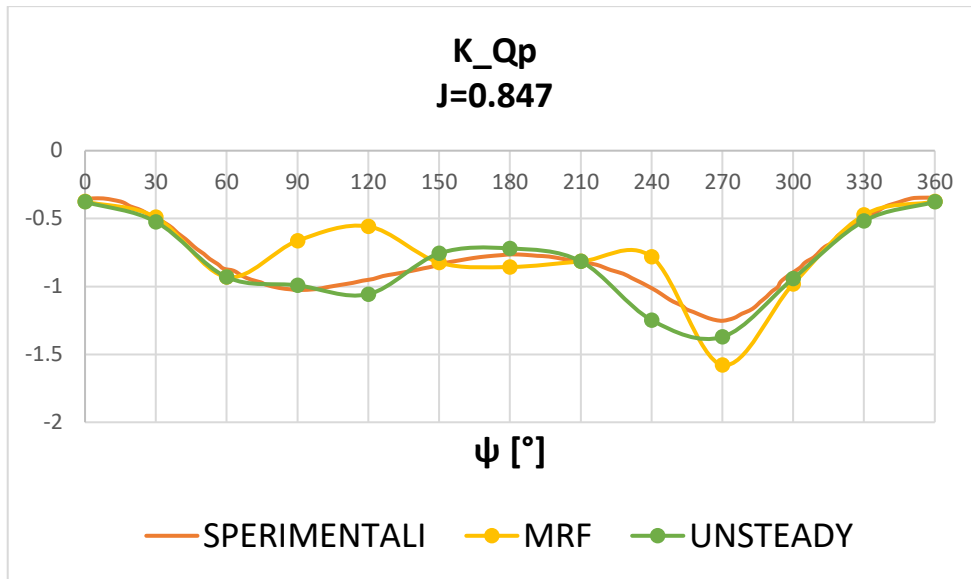


Grafico 11.  $K_{Qp}$  per  $J = 0.847$ .

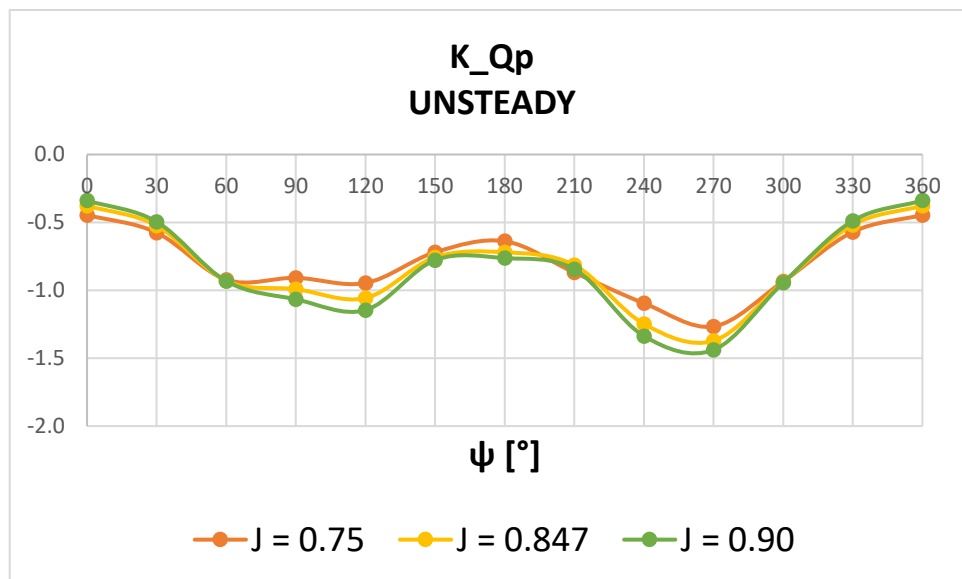


Grafico 12.  $K_{Qp}$  per i tre J considerati.

### 3.2.2 Coefficienti relativi alla struttura del pod

In questa sezione si riportano i grafici relativi alle forze ed al momento  $Mz$  adimensionalizzati a cui è soggetto il pod al variare dell'angolo di azimuth.



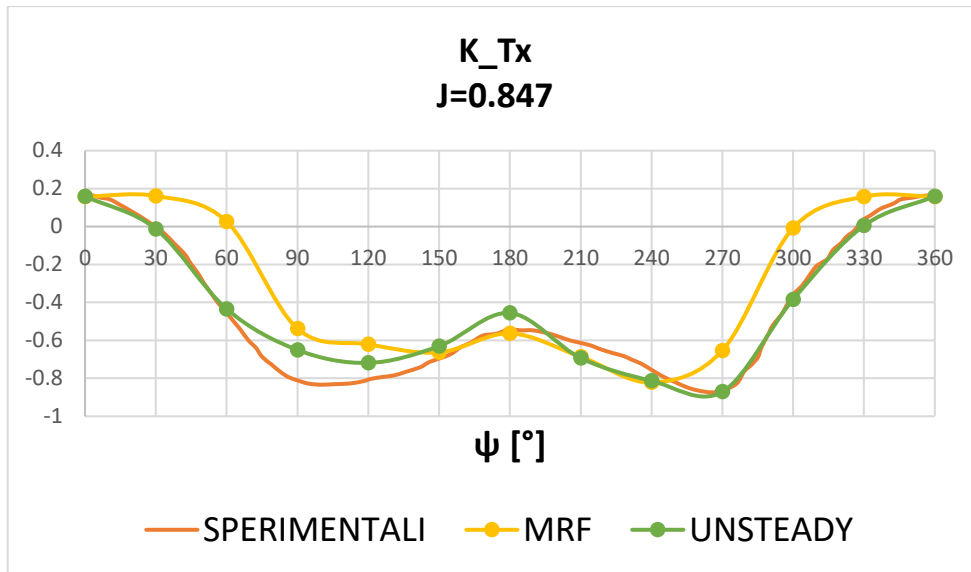


Grafico 13.  $K_{Tx}$  per  $J = 0.847$ .

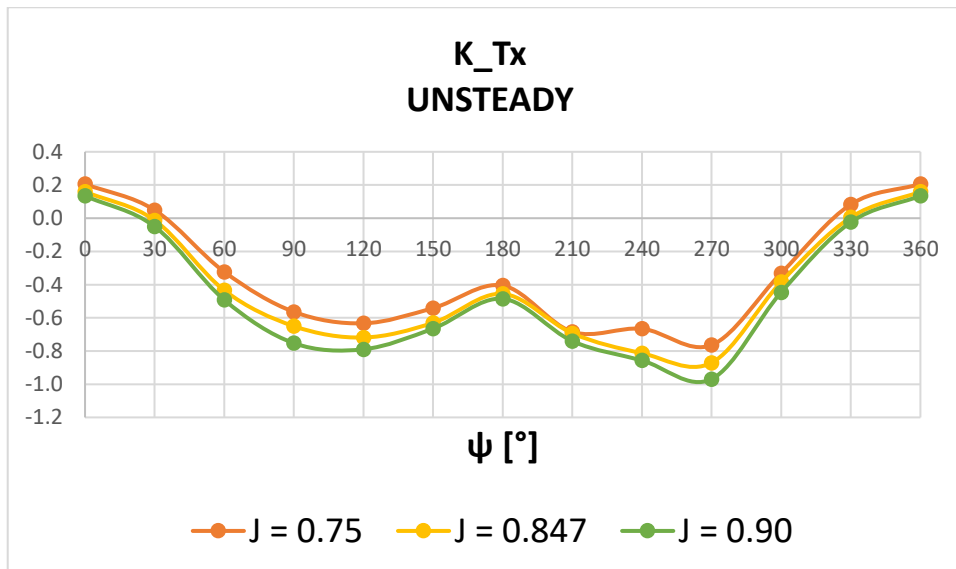


Grafico 14.  $K_{Tx}$  per i tre J considerati.

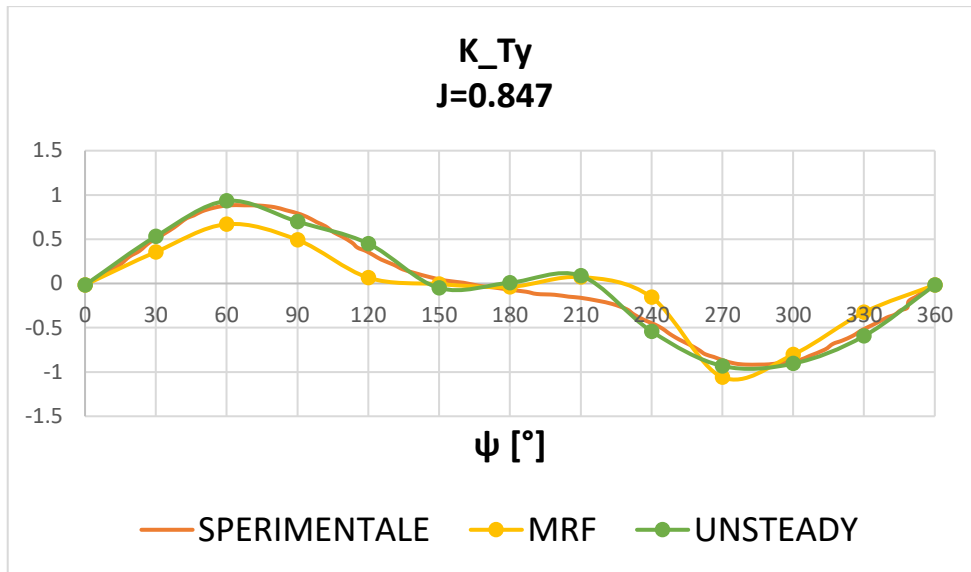


Grafico 15.  $K_{Ty}$  per  $J = 0.847$ .

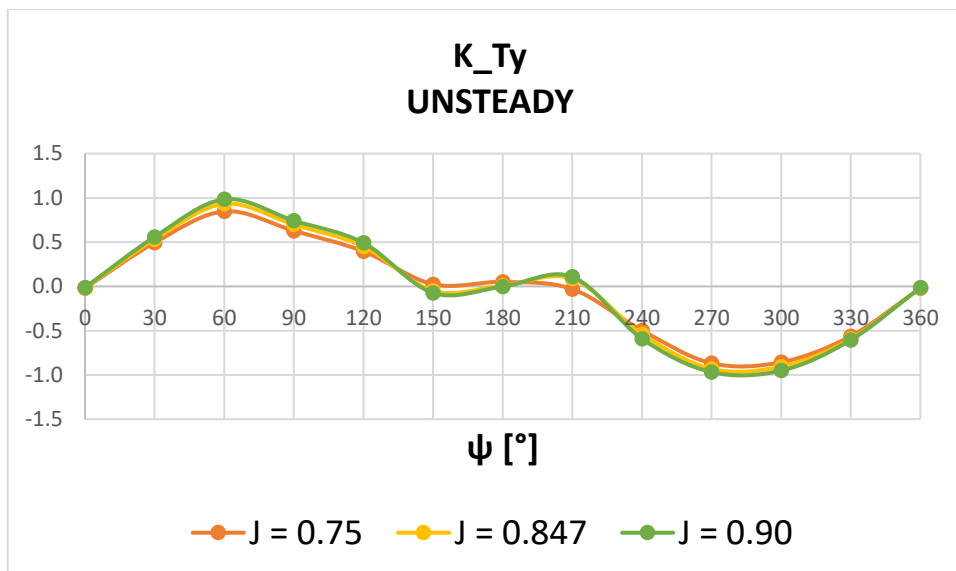


Grafico 16.  $K_{Ty}$  per i tre J considerati.

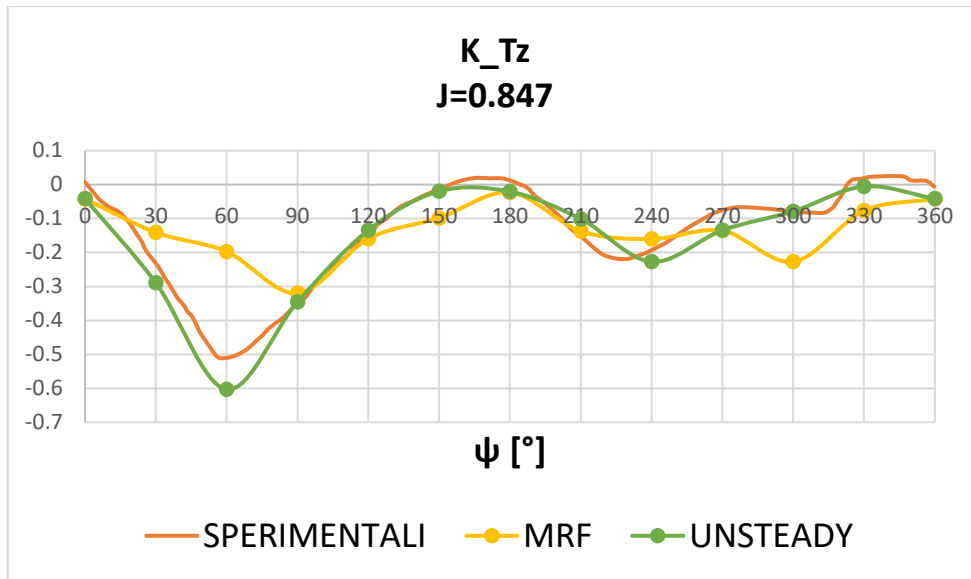


Grafico 17.  $K_{Tz}$  per  $J = 0.847$ .

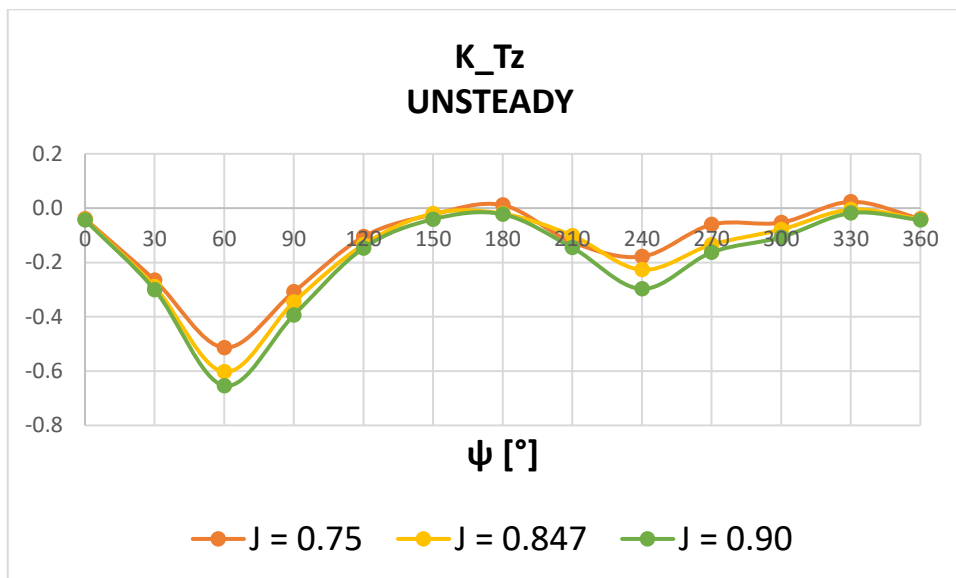


Grafico 18.  $K_{Tz}$  per i tre J considerati.

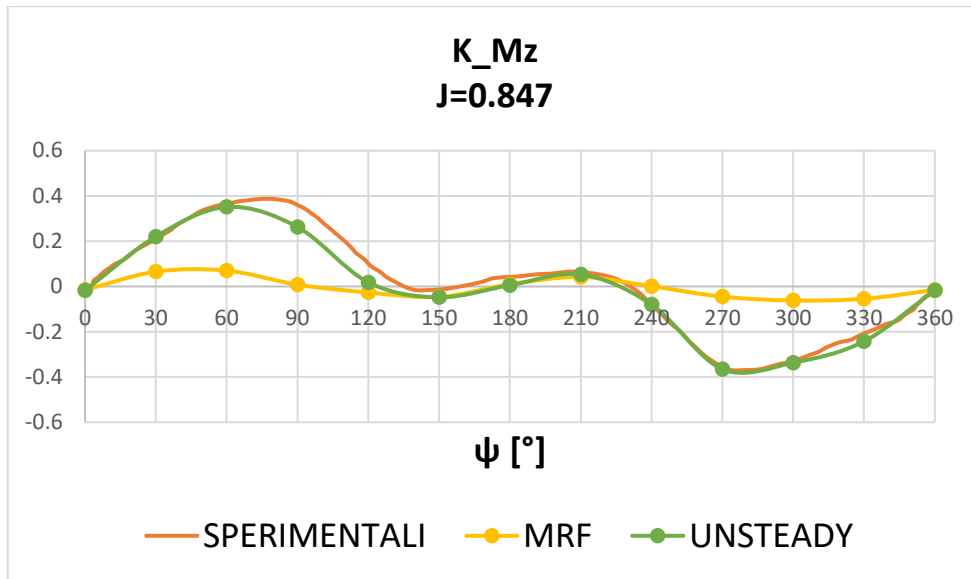


Grafico 19.  $K_{Mz}$  per  $J = 0.847$ .

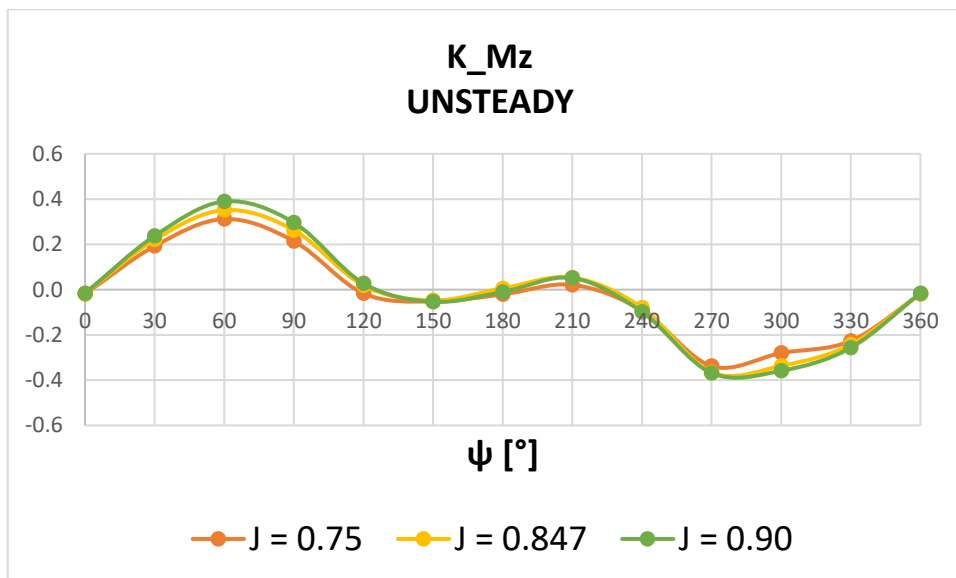


Grafico 20.  $K_{Mz}$  per i tre J considerati.

Si può osservare come il modello preveda molto bene le forze agenti sulla struttura del pod piuttosto che le forze espresse dall'elica. Questo soprattutto ad angoli di rotazione del pod molto elevati.

### 3.3 Storie temporali dei coefficienti adimensionali ai tre J studiati

Qui di seguito vengono riportate le storie temporali dei coefficienti adimensionali relativi all'elica per i tre diversi coefficienti d'avanzo studiati: 0.75, 0.847, 0.90.

A differenza dei grafici precedenti, dove vengono illustrati dei valori mediati sull'ultimo giro fatto dall'elica, nelle figure sottostanti si illustrano i valori temporali puntuali dei coefficienti in esame. Questo per illustrare la difficoltà nell'ottenere un segnale periodico e stabile per angoli di azimuth caratterizzati da grossi buchi di scia ed elevate turbolenze.

#### 3.3.1 Storie temporali dei coefficienti relativi all'elica

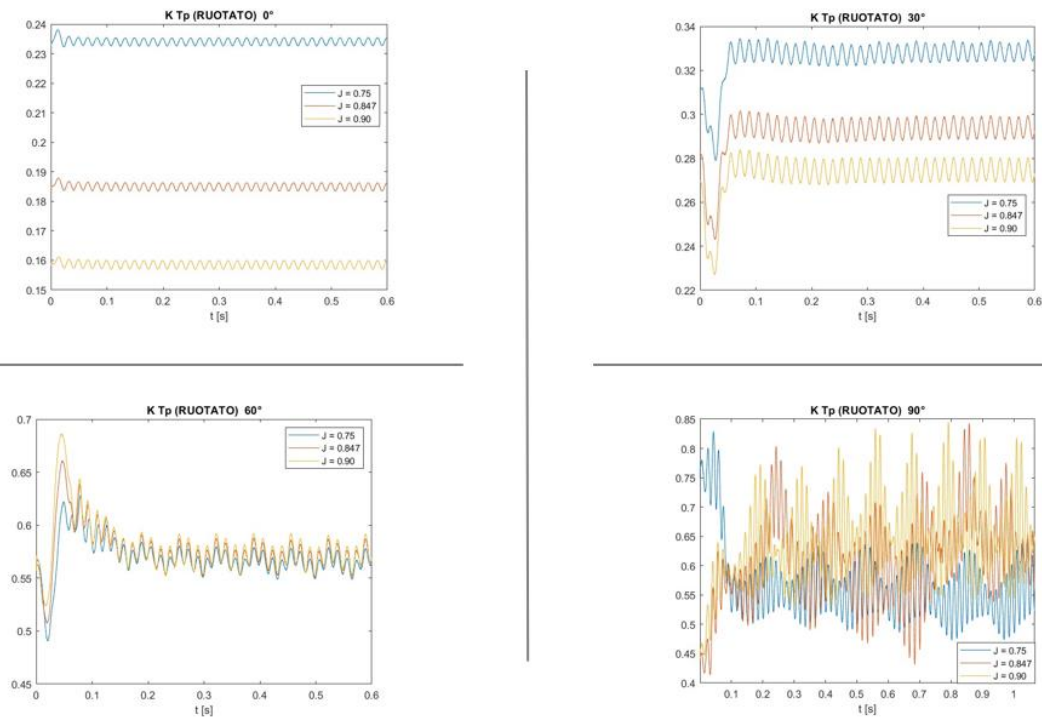


Figura 51.  $K_{Tp}$  relativi all'elica nel riferimento ruotato da 0° a 90°.

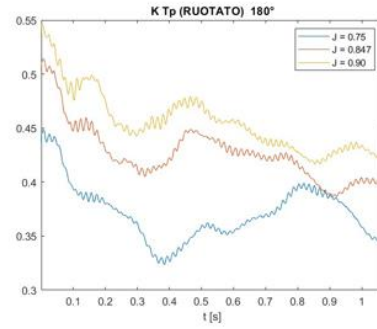
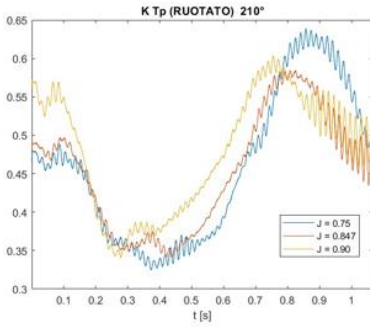
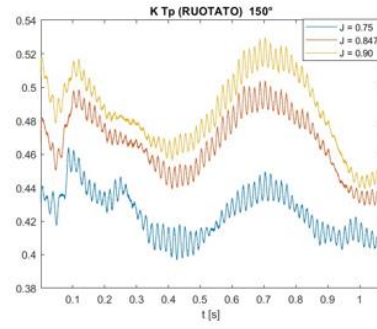
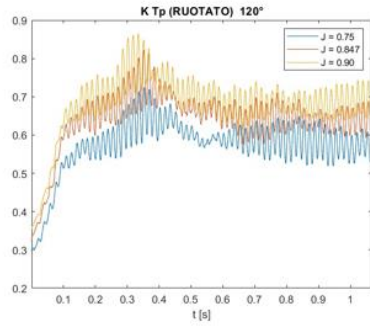


Figura 52.  $K_{Tp}$  relativi all'elica nel riferimento ruotato da  $120^\circ$  a  $180^\circ$ .

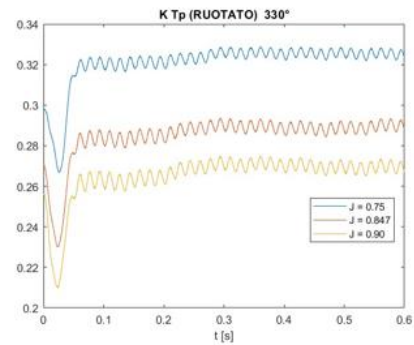
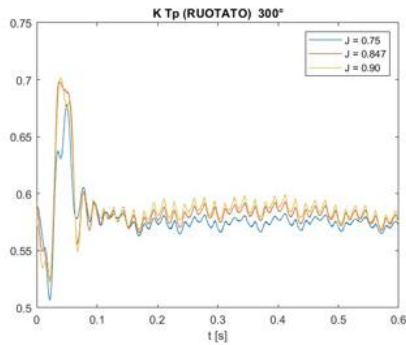
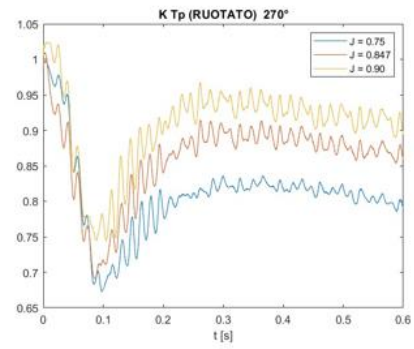
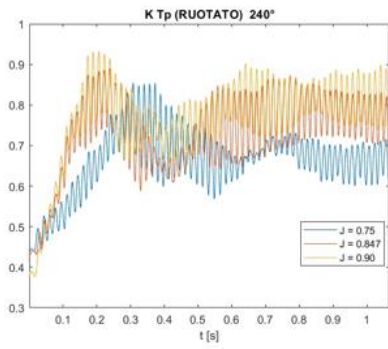


Figura 53.  $K_{Tp}$  relativi all'elica nel riferimento ruotato da  $210^\circ$  a  $330^\circ$ .

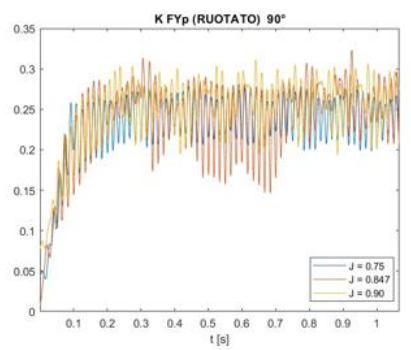
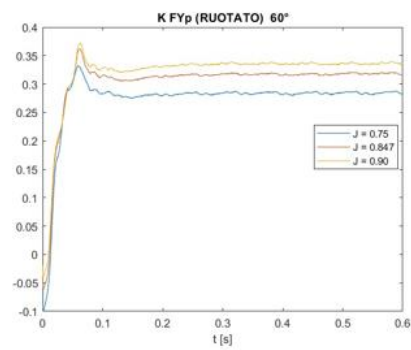
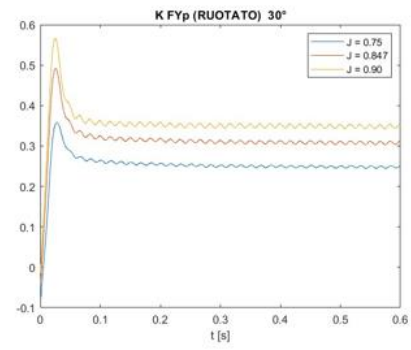
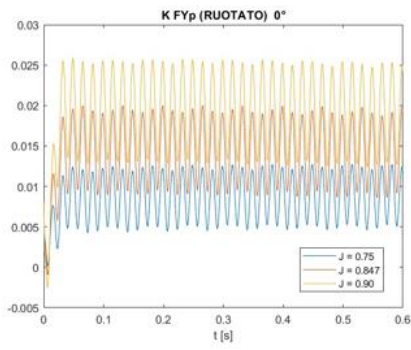


Figura 54.  $K_{FYp}$  relativi all'elica nel riferimento ruotato da  $0^\circ$  a  $90^\circ$ .

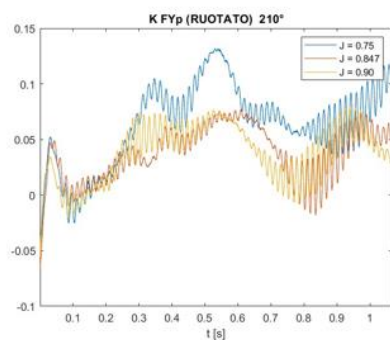
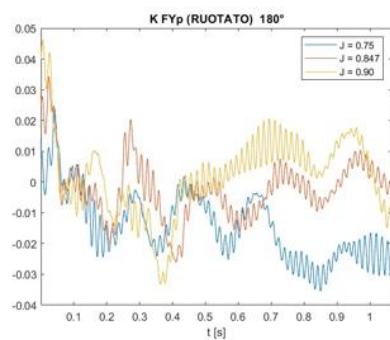
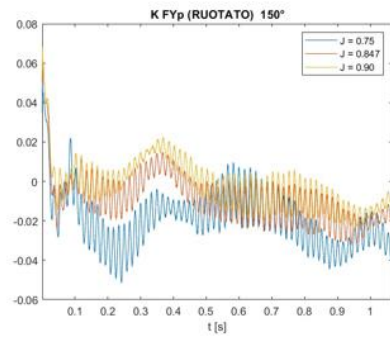
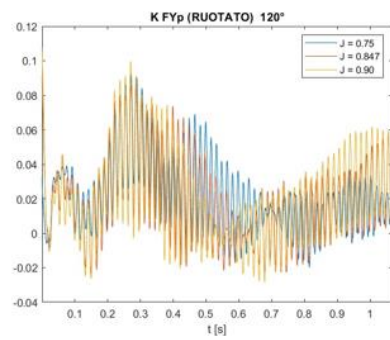


Figura 55.  $K_{FYp}$  relativi all'elica nel riferimento ruotato da  $120^\circ$  a  $210^\circ$ .

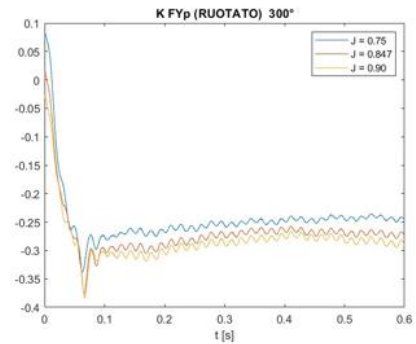
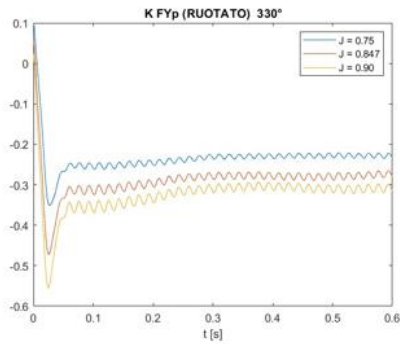
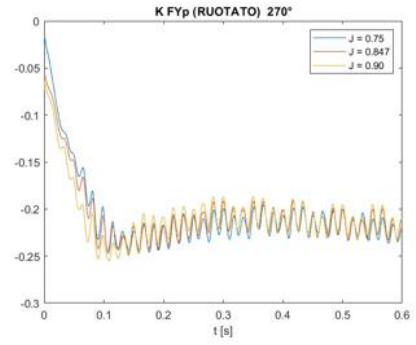
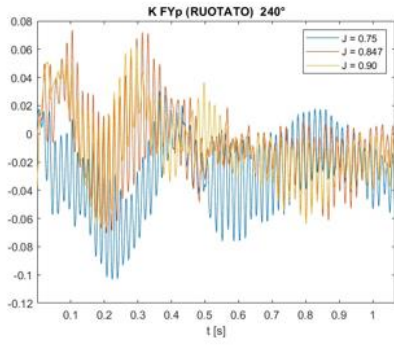


Figura 56.  $K_{FYp}$  relativi all'elica nel riferimento ruotato da  $240^\circ$  a  $330^\circ$ .

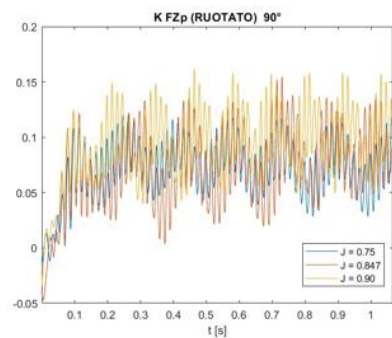
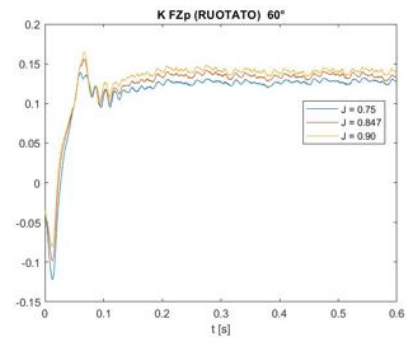
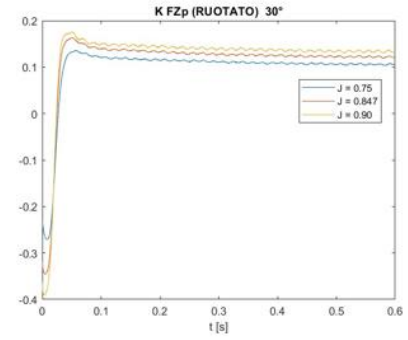
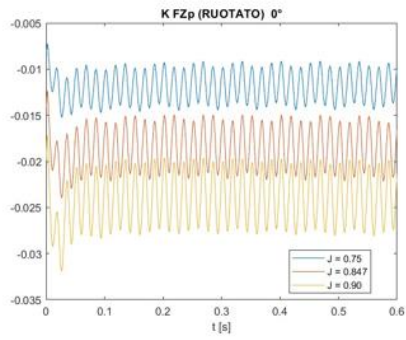


Figura 57.  $K_{FZp}$  relativi all'elica nel riferimento ruotato da  $0^\circ$  a  $90^\circ$ .



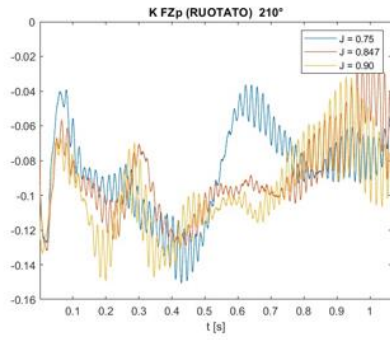
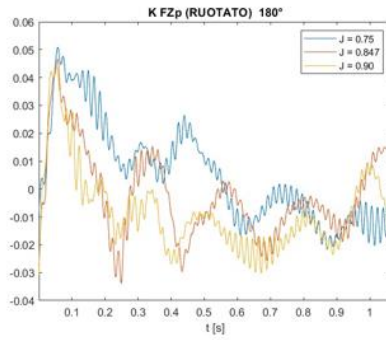
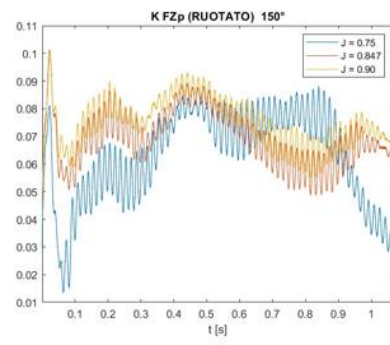
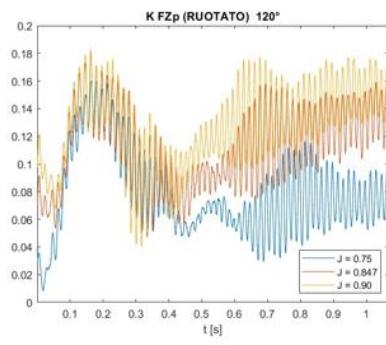


Figura 58.  $K_{FZp}$  relativi all'elica nel riferimento ruotato da  $120^\circ$  a  $240^\circ$ .

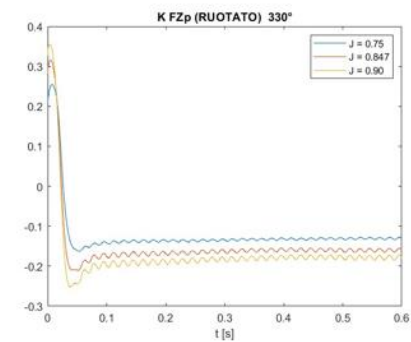
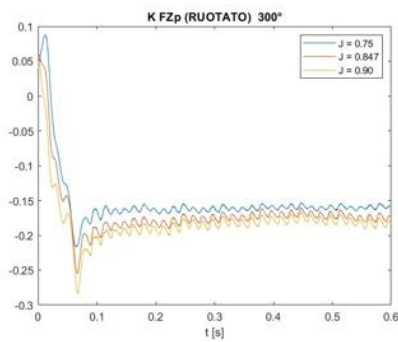
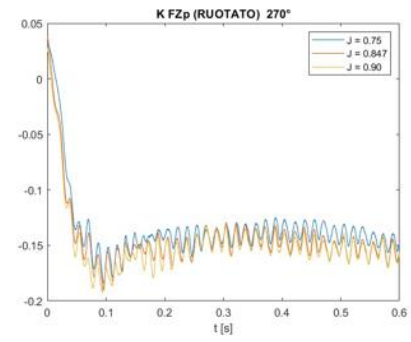
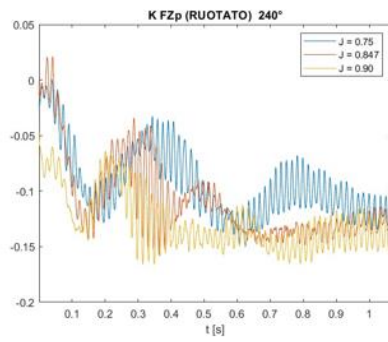


Figura 59.  $K_{FZp}$  relativi all'elica nel riferimento ruotato da  $240^\circ$  a  $330^\circ$ .

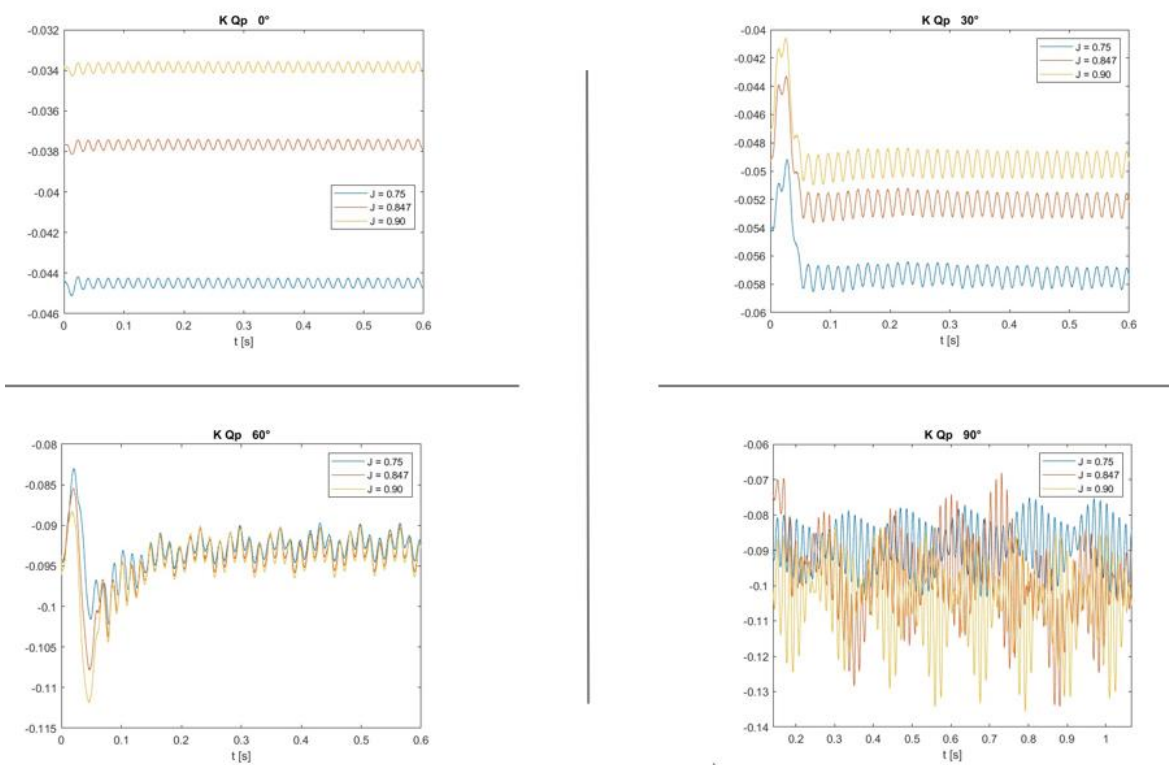


Figura 60.  $K_{Qp}$  relativi all'elica nel riferimento ruotato da  $0^\circ$  a  $90^\circ$ .

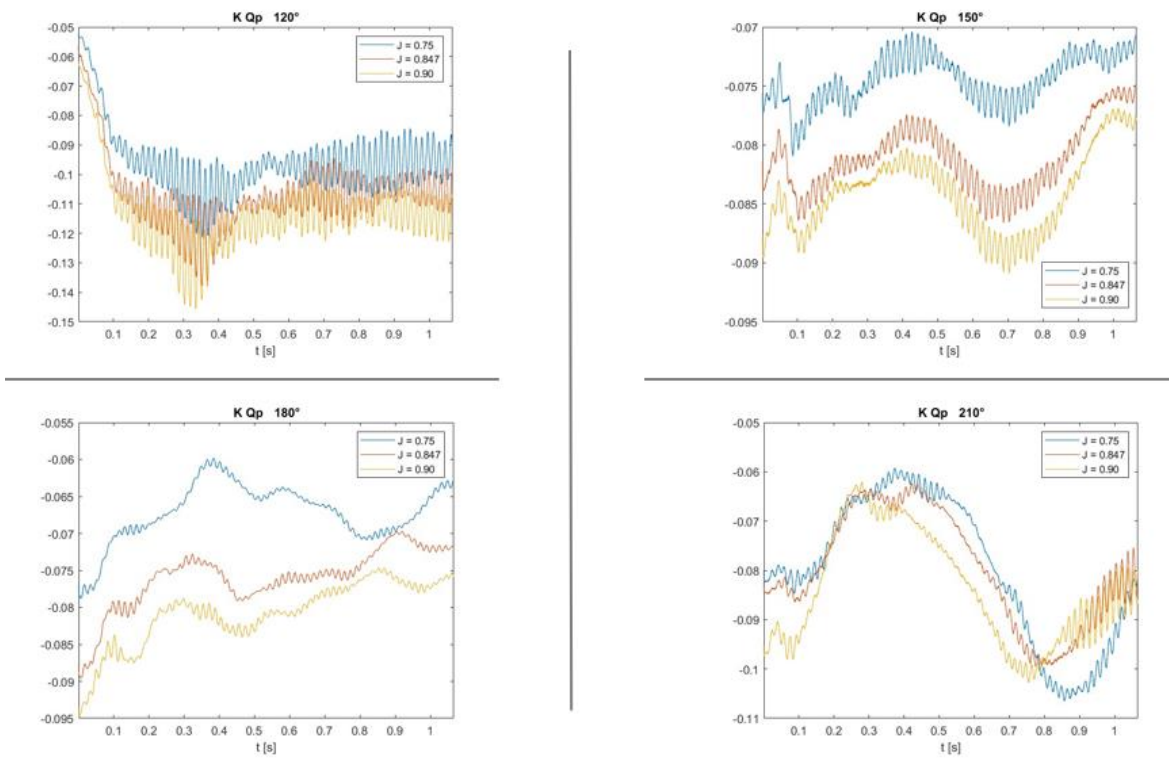


Figura 61.  $K_{Qp}$  relativi all'elica nel riferimento ruotato da  $120^\circ$  a  $240^\circ$ .

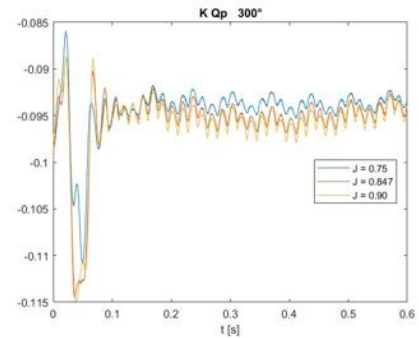
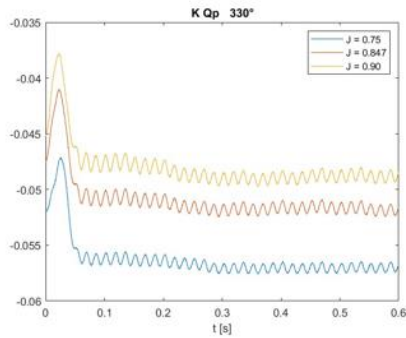
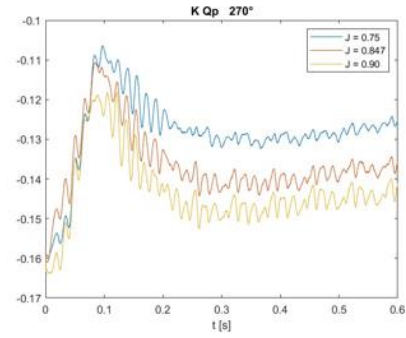
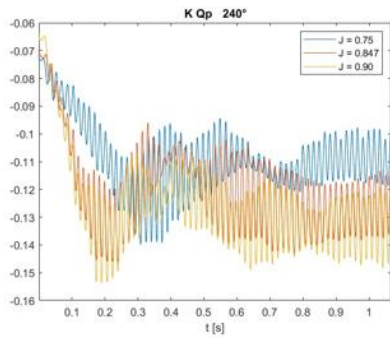


Figura 62.  $K_{Qp}$  relativi all'elica nel riferimento ruotato da  $240^\circ$  a  $330^\circ$ .

### 3.3.2 Storie temporali dei coefficienti relativi alla singola pala nell'ultimo giro dell'elica

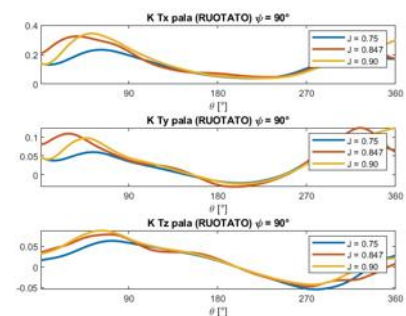
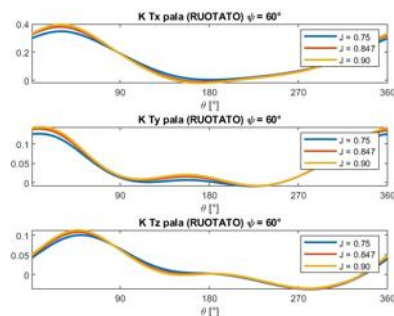
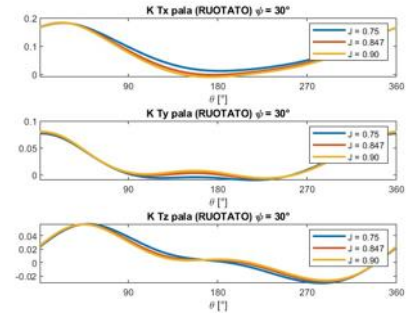
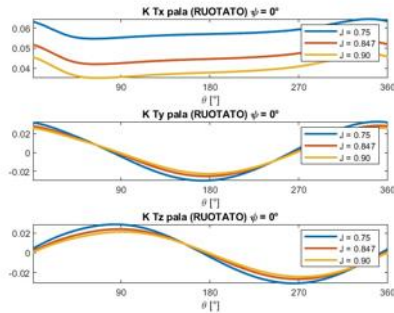


Figura 63.  $K_{Tx}$ ,  $K_{Ty}$  e  $K_{Tz}$  relativi alla singola pala nel riferimento ruotato da  $0^\circ$  a  $90^\circ$ .



### 3.3.3 Confronto storie temporali dei coefficienti relativi alla singola pala negli ultimi due giri di rotazione dell'elica

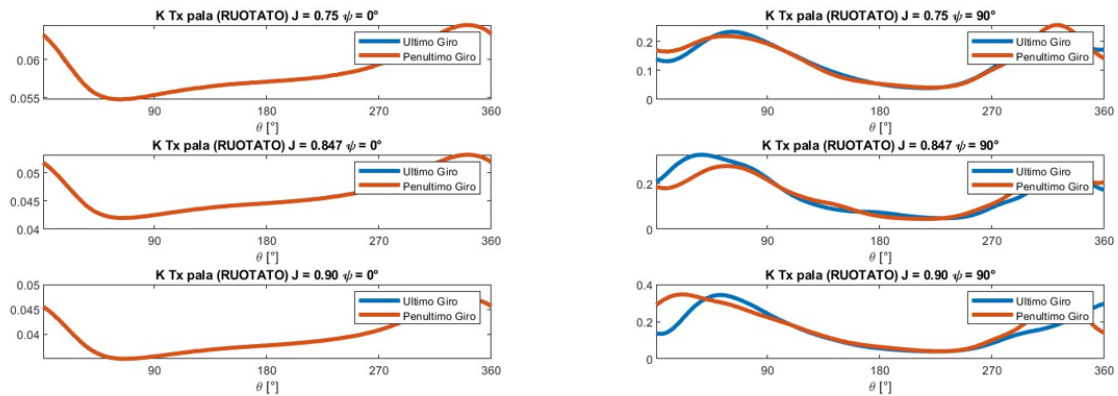


Figura 66.  $K_{Tx}$  della singola pala a  $0^\circ$  e  $90^\circ$ .

In figura 66 si può osservare l'andamento negli ultimi due giri del coefficiente  $K_{Tx}$  espresso dalla singola pala nel sistema di riferimento ruotato per angoli di rotazione del pod pari a  $0^\circ$  e  $90^\circ$ ; si osserva che, se a  $0^\circ$  non vi è differenza nel segnale tra un giro e l'altro, ai tre diversi valori di  $J$ , a  $90^\circ$  c'è scostamento tra le due curve. Questo a causa del campo di moto fluido attorno al pod che risulta fortemente disturbato dalla turbolenza per angoli di azimuth molto elevati.

In tale configurazione, infatti, si registrano molte difficoltà nell'ottenere periodicità del segnale, questo anche per un elevato numero di rivoluzioni dell'elica.

In figura 67 e 68 si riporta il medesimo concetto per quanto riguarda  $K_{Ty}$  e  $K_{Tz}$ , sempre nel sistema di riferimento ruotato con l'elica.

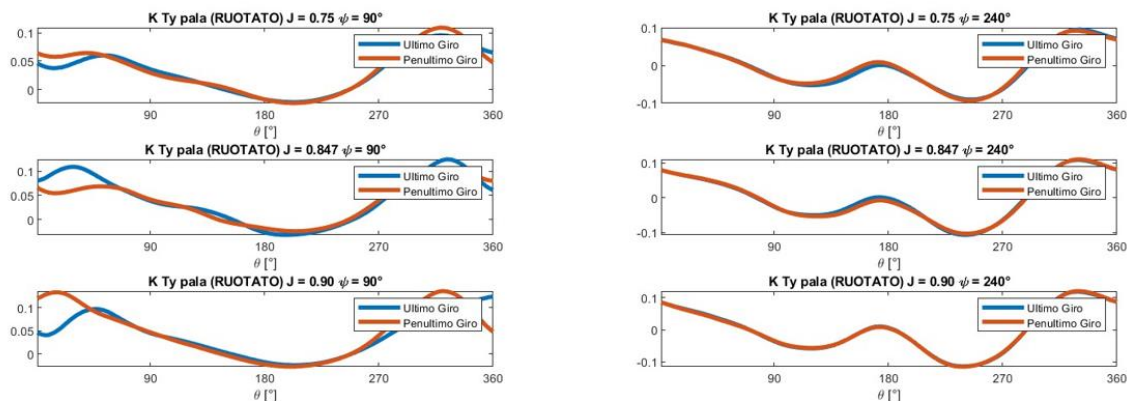


Figura 67.  $K_{Ty}$  della singola pala a  $90^\circ$  e  $240^\circ$ .



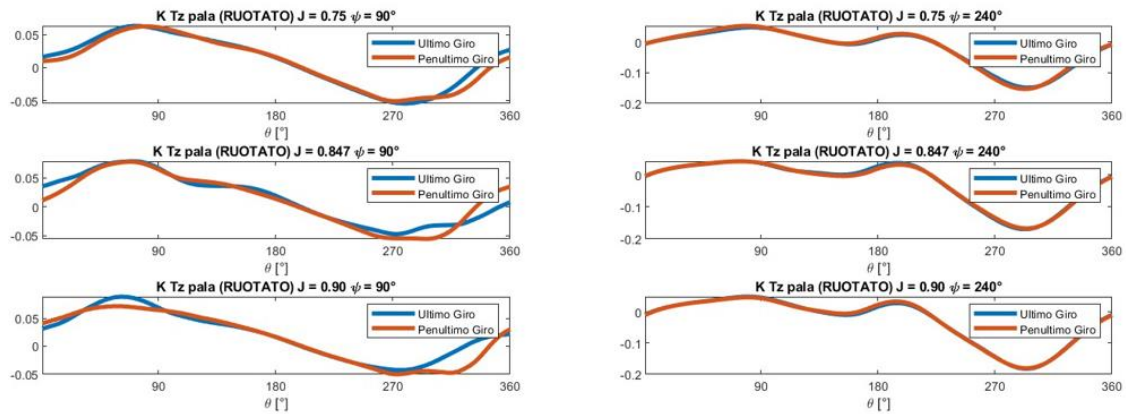


Figura 68.  $K_{Tz}$  della singola pala a  $90^\circ$  e  $240^\circ$ .

### 3.3.4 Confronto coefficienti mediati vs valori all'ultimo giro dell'elica

Qui di seguito si riportano, per completezza, i grafici rappresentativi dell'andamento, nell'ultimo giro di rotazione dell'elica, della spinta e della coppia, adimensionalizzate, espresse dell'elica,  $K_{Tp}$  e  $K_{Qp}$ .

Nello specifico, si riporta l'andamento per una configurazione propulsiva di tipo *Pull*, a  $J = 0.847$ , per valori dell'angolo di azimuth pari a  $0^\circ$ ,  $90^\circ$ ,  $180^\circ$  e  $270^\circ$ .

Tali storie temporali sono confrontate con il rispettivo valore medio, nell'ultimo giro, che rappresenta il dato utilizzato per il confronto con gli esperimenti in vasca.

Si evidenzia che il singolo istante temporale di simulazione coincide con un angolo pari a  $1^\circ$  di rotazione dell'elica.

Avendo assunto una velocità di rotazione dell'elica pari a 15 rps, il singolo istante temporale (DT) è pari a  $1.85 \cdot 10^{-4}$  s.

Si riporta per comodità in asse x la posizione angolare della pala. Considerando che nell'ultimo giro di rotazione dell'elica ci sono 360 posizioni angolari da percorrere a cui corrispondono altrettanti istanti temporali, per come è stata impostata la fisica. Quindi in asse x sono riportati dei valori di  $\vartheta$  da 1 a 360  $[\circ]$ .

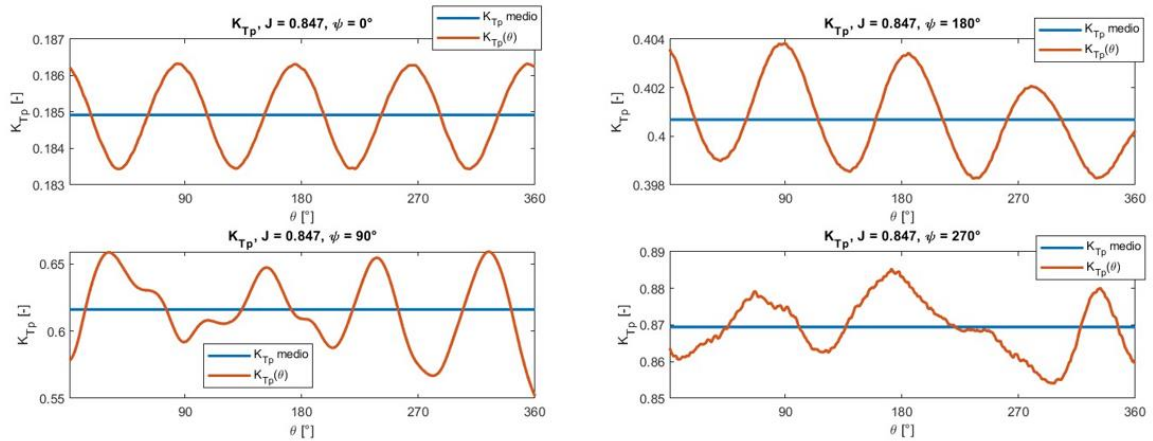


Figura 69.  $K_{Tp}$  espresso dall'elica. Si osserva in blu il valore medio e in rosso la storia temporale all'ultimo giro per  $\psi$  pari a  $0^\circ$ ,  $90^\circ$ ,  $180^\circ$  e  $270^\circ$ .

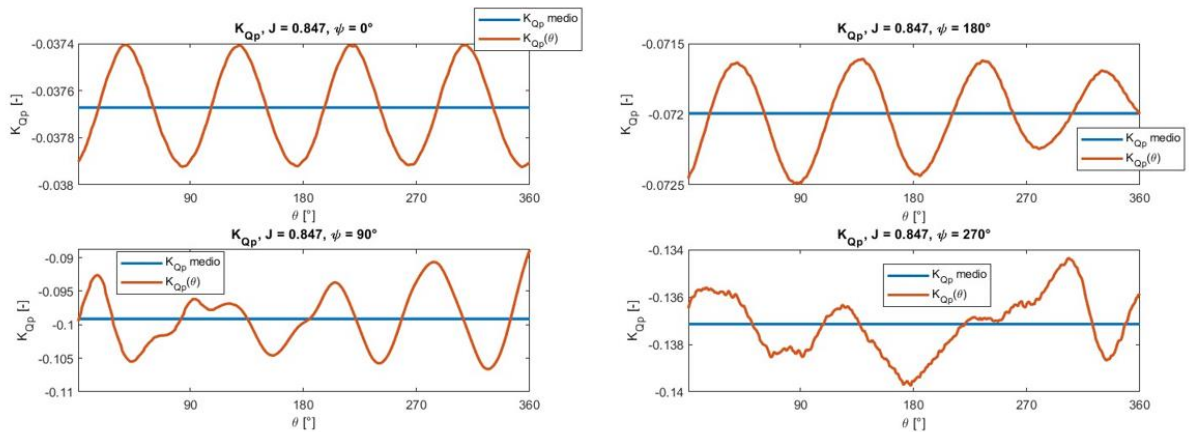


Figura 70.  $K_{Qp}$  espresso dall'elica. Si osserva in blu il valore medio e in rosso la storia temporale all'ultimo giro per  $\psi$  pari a  $0^\circ$ ,  $90^\circ$ ,  $180^\circ$  e  $270^\circ$ .

Osservando le figure di pagina precedente, si può notare che il segnale a  $0^\circ$  e a  $360^\circ$  non ha lo stesso valore. Questo è indice della non periodicità del segnale, soprattutto ad angoli elevati, che non permette la coincidenza con il valore sperimentale. Ne consegue che un aumento del numero di rotazioni dell'elica, e dunque di istanti temporali, favorirebbe in tal senso il confronto.

### 3.4 Campo di velocità $V_x$ in $Z = 0$ per $J = 0.847$ per $\psi$ da $0^\circ$ a $360^\circ$

Dopo aver illustrato l'andamento mediato e nel tempo dei coefficienti adimensionali ottenuti nel corso della campagna di simulazioni condotta, per il caso *Pull*, si riporta qui di seguito l'andamento del campo di moto fluido nella componente  $V_x$  della velocità nel piano  $Z = 0$ . Questo per  $J = 0.847$  e al variare dell'angolo di rotazione del pod  $\psi$  da  $0^\circ$  a  $360^\circ$ . Si ricorda inoltre, per facilitare la comprensione grafica, che la velocità indisturbata dalla rotazione dell'elica è costante e pari a 2.8 m/s proveniente da destra verso sinistra.

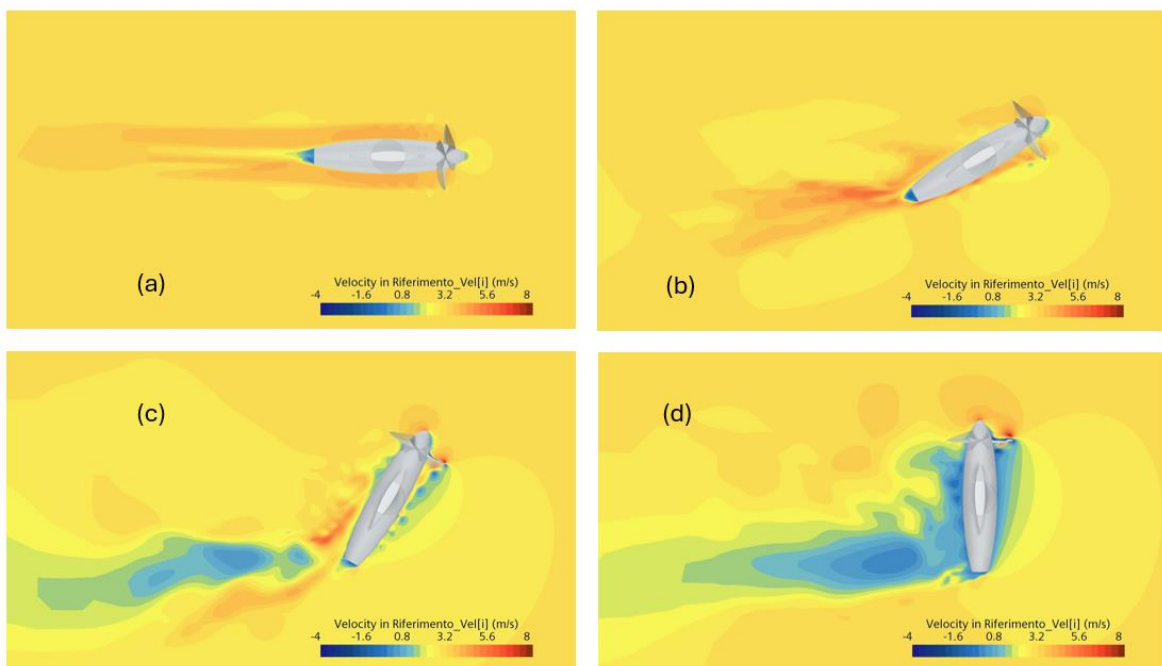


Figura 71.  $V_x$  nel piano  $Z = 0$  per  $\psi$  pari a: (a)  $0^\circ$ , (b)  $30^\circ$ , (c)  $60^\circ$ , (d)  $90^\circ$ .



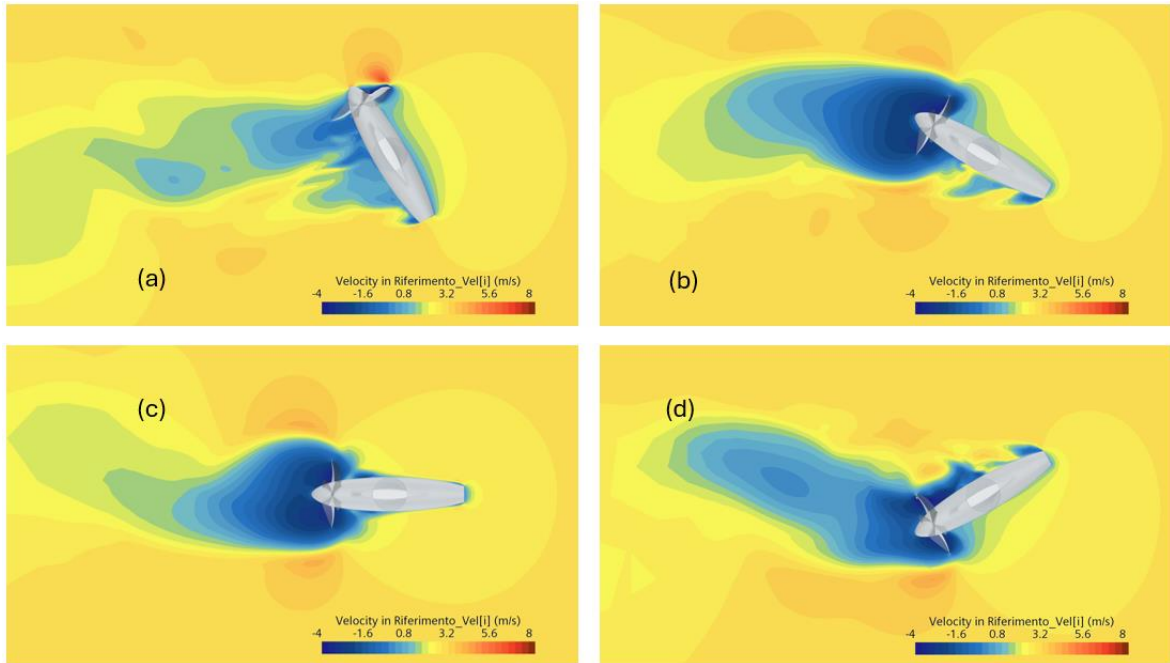


Figura 72.  $V_x$  nel piano  $Z = 0$  per  $\psi$  pari a: (a)  $120^\circ$ , (b)  $150^\circ$ , (c)  $180^\circ$ , (d)  $210^\circ$ .

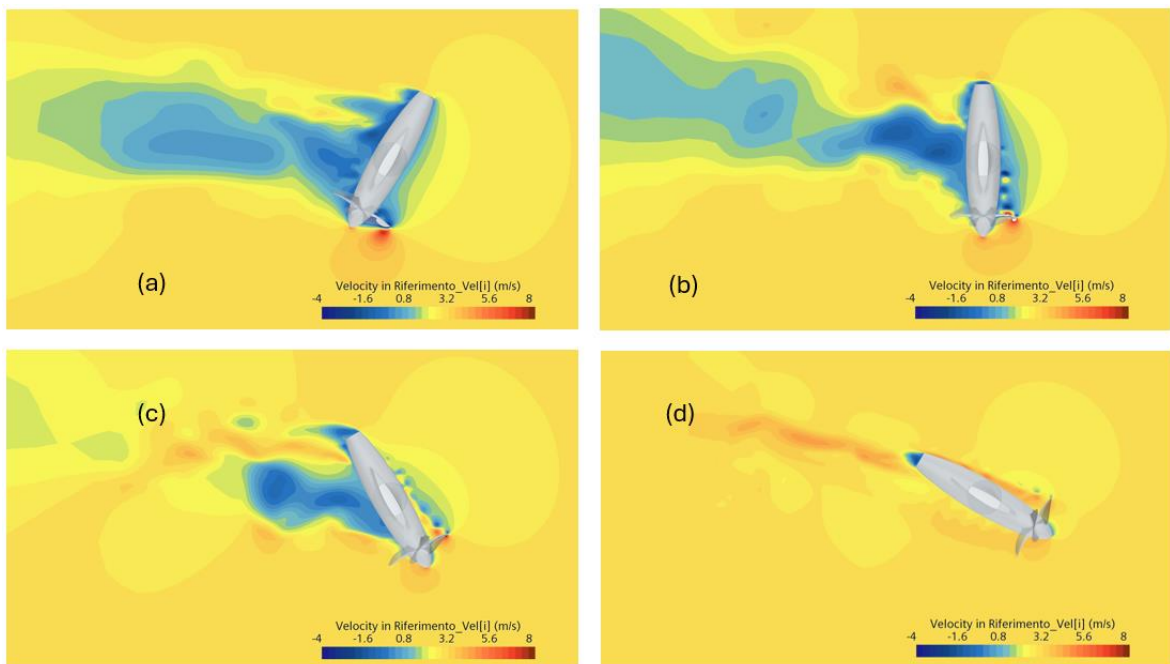


Figura 73.  $V_x$  nel piano  $Z = 0$  per  $\psi$  pari a: (a)  $240^\circ$ , (b)  $270^\circ$ , (c)  $300^\circ$ , (d)  $330^\circ$ .

Osservando le figure soprastanti si può notare che:

- Per  $0^\circ < \psi < 90^\circ$  e  $270^\circ < \psi < 360^\circ$  l'elica accelera il flusso verso la poppa di dell'ipotetica nave a cui è collegato;

- Per  $90^\circ < \psi < 180^\circ$  e  $180^\circ < \psi < 270^\circ$  l'elica accelera il flusso verso la prua dell'ipotetica nave a cui è collegato;
- Essendo l'elica sempre destrorsa, il campo di moto fluido non è perfettamente simmetrico. Questo si osserva se si confronta ciò che succede per il range di angoli di azimuth da  $0^\circ$  a  $180^\circ$  con ciò che avviene per il range da  $180^\circ$  a  $360^\circ$ .
- Quando l'angolo di azimuth è nell'intorno dei  $180^\circ$ , l'elica prova a spingere il flusso nella direzione in cui gli arriva il fluido indisturbato. Questo genera una grossa zona di ricircolo intorno all'elica (macchia blu).

## 4. Analisi in configurazione *Push* per $J = 0.847$

In questa sezione vengono esposti alcuni dei risultati ottenuti dalla campagna di simulazioni effettuata, considerando la configurazione propulsiva di tipo *Push*, con elica posizionata a poppa, per un unico valore del coefficiente d'avanzo  $J$  pari a 0.847.

Questo impostando una mesh con base size pari a 0.18 m e per valori dell'angolo di azimuth  $\psi$  da  $0^\circ$  a  $360^\circ$  con intervallo pari a  $30^\circ$  tra simulazione e simulazione.

Le simulazioni condotte sono state effettuate impostando una sotto-simulazione MRF con 1080 iterazioni stazionarie e poi dopo cambiandola, impostando una simulazione di tipo non stazionario e caratterizzata da 16 giri di rotazione dell'elica (5760 iterazioni temporali di simulazione).

### 4.1 Coefficienti adimensionali

I risultati vengono presentati in termini di coefficienti adimensionali  $K_{TP}$ ,  $K_{FYP}$ ,  $K_{FZP}$ ,  $K_{QP}$ ,  $K_{Tx}$ ,  $K_{Ty}$ ,  $K_{Tz}$  e  $K_{Mz}$ .

I valori sono i risultati ottenuti effettuando una media temporale sui valori ottenuti nell'ultimo giro di rotazione dell'elica nelle configurazioni ai diversi angoli di azimuth per il singolo valore del coefficiente d'avanzo e per quanto riguarda una **soluzione Non-Stazionaria**. Questo per una base size pari a 0.18 m che ha portato a un numero di celle per ogni simulazione circa pari a cinque milioni. Si ricorda che i valori dei coefficienti rappresentativi delle componenti delle forze lungo l'asse  $y$  sono di segno opposto rispetto a quanto è stato ottenuto sperimentalmente da Heinke &co; questo a causa del sistema di riferimento da loro adottato, caratterizzato da un asse  $y$  di segno opposto rispetto alla

notazione da noi adottata. Il dato sperimentale per  $K_{FYp}$  e  $K_{Ty}$  è stato cambiato di segno rispetto a quello che riporta il paper per comodità di confronto con quanto ottenuto mediante CFD.

#### 4.1.1 Risultati per $J = 0.847$

$\psi$ [°]	$K_{Tp}$	$K_{F\_Yp}$	$K_{F\_Zp}$	$K_{Qp}$
0	0.2009	0.0046	0.0162	0.0407
30	0.1738	0.3132	0.0704	0.0340
60	0.3928	0.2403	-0.0441	0.0672
90	0.5345	0.2097	0.0338	0.0877
120	0.7825	0.1227	0.0416	0.1255
150	0.7683	-0.0187	0.0133	0.1303
180	0.5141	-0.0073	0.0381	0.0895
210	0.4997	-0.0678	-0.0135	0.0877
240	0.6716	-0.1725	-0.1311	0.1089
270	0.6887	-0.2072	-0.1630	0.1125
300	0.5501	-0.2180	-0.0979	0.0918
330	0.4012	-0.1558	-0.0221	0.0714
360	0.2009	0.0046	0.0162	0.0407

Tabella 34. Coefficienti adimensionali relativi all'elica in configurazione *Push*.

$\psi$ [°]	$K_{Tx}$	$K_{Ty}$	$K_{Tz}$	$K_{Mz}$
0	0.1685	0.0028	-0.0271	0.0006
30	-0.0886	0.3854	-0.1574	0.0324
60	-0.3803	0.6492	-0.4451	-0.0227
90	-0.5918	0.5574	-0.3429	-0.0349
120	-0.7909	0.4246	-0.3366	-0.0707
150	-0.6782	0.2718	-0.3004	0.0376
180	-0.4944	0.1562	-0.0110	0.0432
210	-0.6399	0.0706	-0.2461	0.1104
240	-0.7598	-0.3800	-0.3828	0.0655
270	-0.6016	-0.7051	-0.3563	0.0234
300	-0.2840	-0.7942	-0.3866	0.0077
330	0.1621	-0.4936	-0.1658	-0.0301
360	0.1685	0.0028	-0.0271	0.0006

Tabella 35. Coefficienti adimensionali relativi alla struttura completa del pod in configurazione *Push*.

## 4.2 Confronto con i dati sperimentali

Vengono qui illustrati in formato grafico i risultati in termini di **coefficienti adimensionali**  $K_{TP}$ ,  $K_{FYP}$ ,  $K_{FZP}$ ,  $K_{QP}$ ,  $K_{Tx}$ ,  $K_{Ty}$ ,  $K_{Tz}$  e  $K_{Mz}$  al variare dell'angolo di azimuth, **mediati sull'ultimo giro di rotazione dell'elica** e, per quanto riguarda  $J = 0.847$  confrontati con i risultati sperimentali. Come verrà illustrato in seguito, i valori all'ultimo giro non sono sufficienti per una buona coincidenza con il valore sperimentale ad angoli elevati.

### 4.2.1 Coefficienti relativi all'elica

In questa sezione si riportano i grafici relativi alle forze ed alla coppia  $Q_p$  adimensionalizzati espressi dall'elica al variare dell'angolo di azimuth.

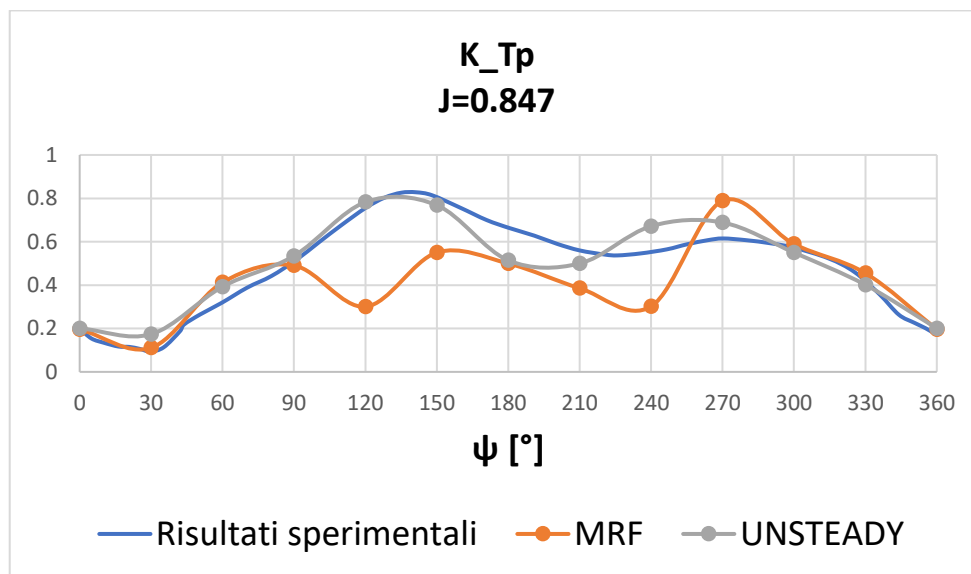


Grafico 21.  $K_{TP}$  per  $J = 0.847$  confrontato con il risultato sperimentale.

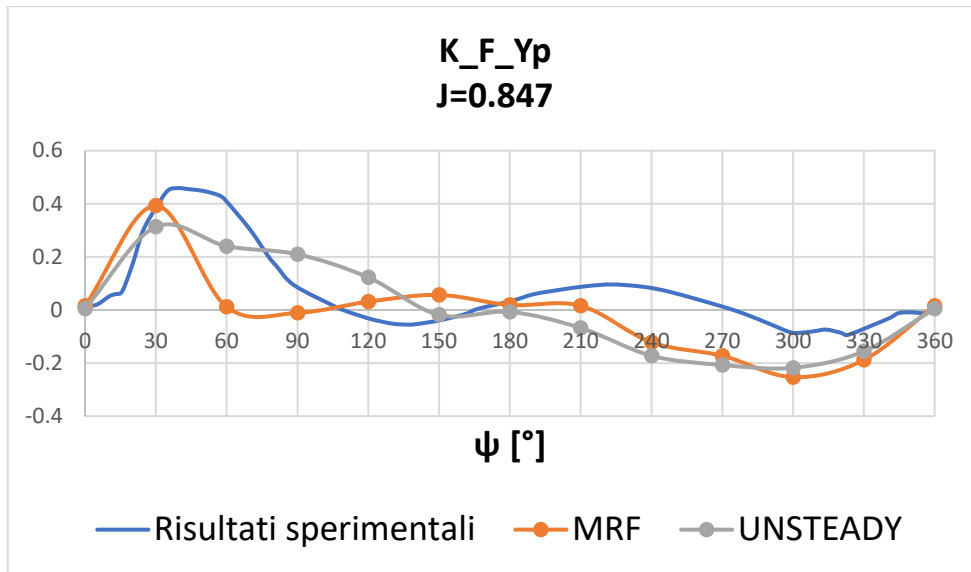


Grafico 22.  $K_{FYp}$  per  $J = 0.847$  confrontato con il risultato sperimentale.

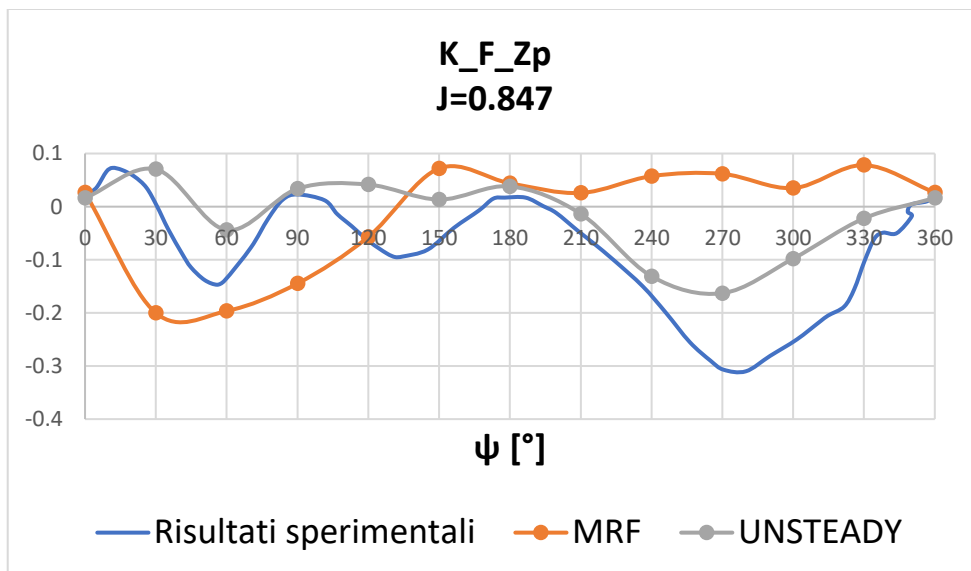


Grafico 23.  $K_{FZp}$  per  $J = 0.847$  confrontato con il risultato sperimentale.

Si osserva che rispetto al caso *Pull*, a parità di modellazione del problema, diventa più difficile replicare i risultati sperimentali ottenuti in vasca.

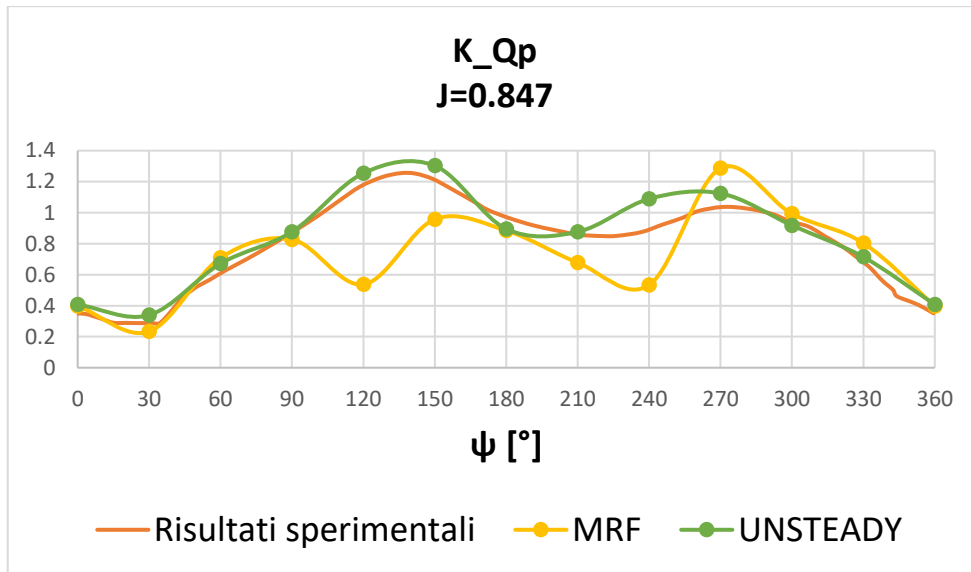


Grafico 24.  $K_{Qp}$  per  $J = 0.847$  confrontato con il risultato sperimentale.

#### 4.2.2 Coefficienti relativi alla struttura del pod

In questa sezione si riportano i grafici relativi alle forze ed al momento  $M_z$  adimensionalizzati, a cui è soggetto il pod al variare dell'angolo di azimuth.

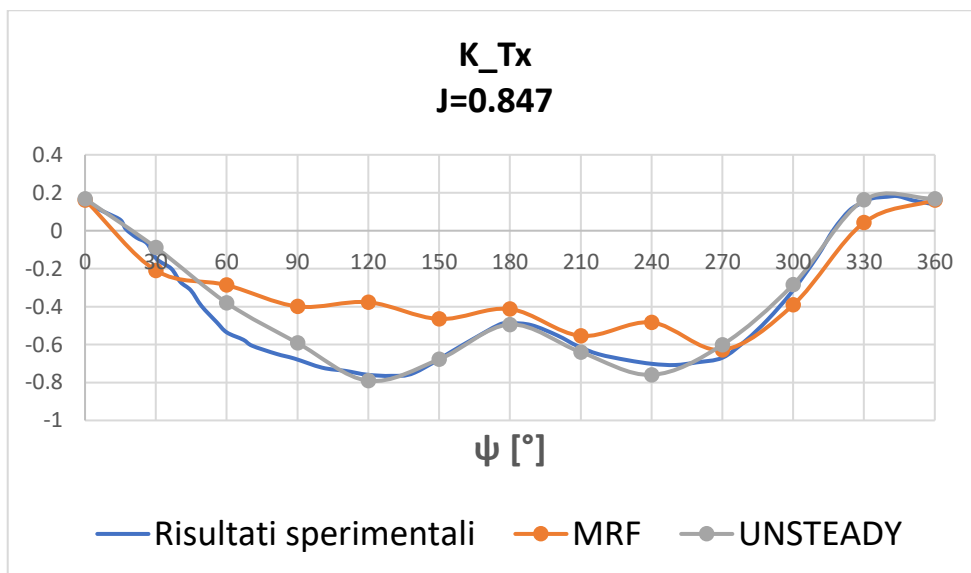


Grafico 25.  $K_{Tx}$  per  $J = 0.847$  confrontato con il risultato sperimentale.

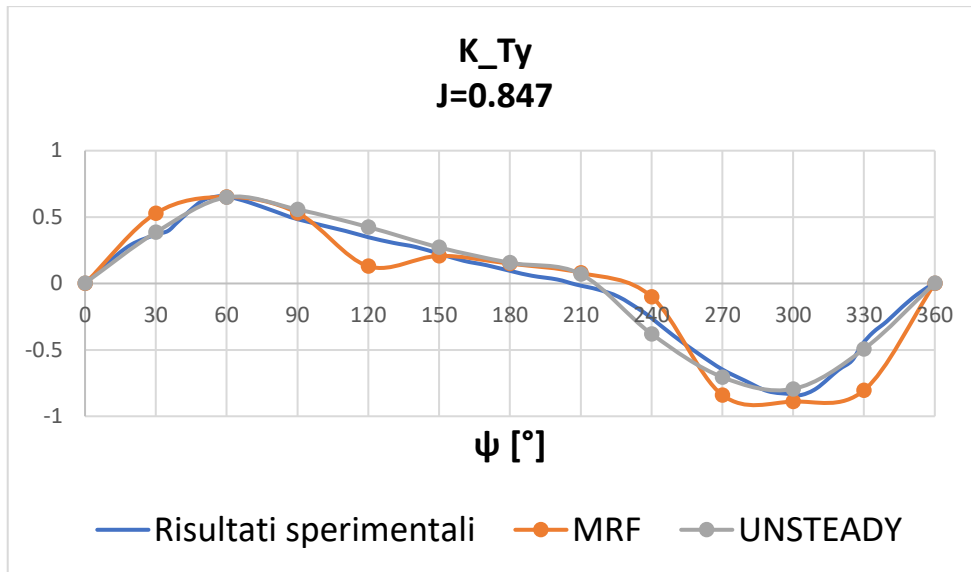


Grafico 26.  $K_{Ty}$  per  $J = 0.847$  confrontato con il risultato sperimentale.

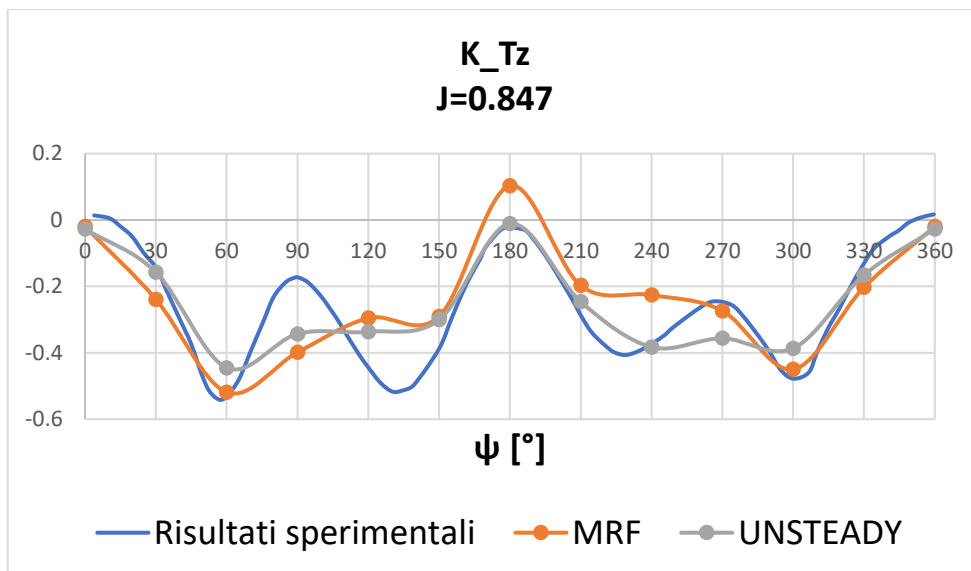


Grafico 27.  $K_{Tz}$  per  $J = 0.847$  confrontato con il risultato sperimentale.

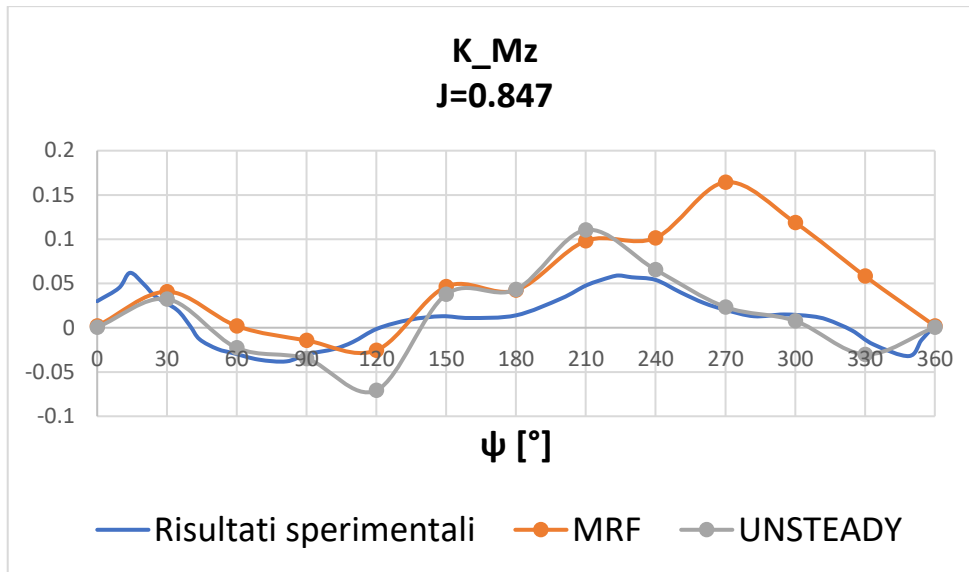


Grafico 28.  $K_{Ty}$  per  $J = 0.847$  confrontato con il risultato sperimentale.

Come per il caso con elica a proravia (*Pull*), il modello implementato risulta particolarmente efficace a prevedere le azioni agenti sulla struttura del pod. E ugualmente si riscontrano difficoltà nell'ottenere valori confrontabili con quelli sperimentali per quanto riguarda le componenti trasversali della spinta.

Come per quanto visto per i coefficienti mediati sull'ultimo giro relativi all'elica, anche per i coefficienti relativi alla struttura completa del pod si evidenziano più difficoltà, rispetto al caso *Pull*, nell'ottenere risultati prossimi a quelli sperimentali.

### 4.3 Campo di velocità $V_x$ in $Z = 0$ per $J = 0.847$ per $\psi$ da $0^\circ$ a $360^\circ$

Dopo aver illustrato l'andamento mediato e nel tempo dei coefficienti adimensionali ottenuti nel corso della campagna di simulazioni condotta, per il caso *Push*, si riporta qui di seguito l'andamento del campo di moto fluido nella componente  $V_x$  della velocità nel piano  $Z = 0$ . Questo per  $J = 0.847$  e al variare dell'angolo di rotazione del pod  $\psi$  da  $0^\circ$  a  $360^\circ$ .

Come per il caso *Pull* si ricorda che la velocità indisturbata nel dominio è costante, in componente  $x$ , e pari a 2.8 m/s proveniente da destra verso sinistra.



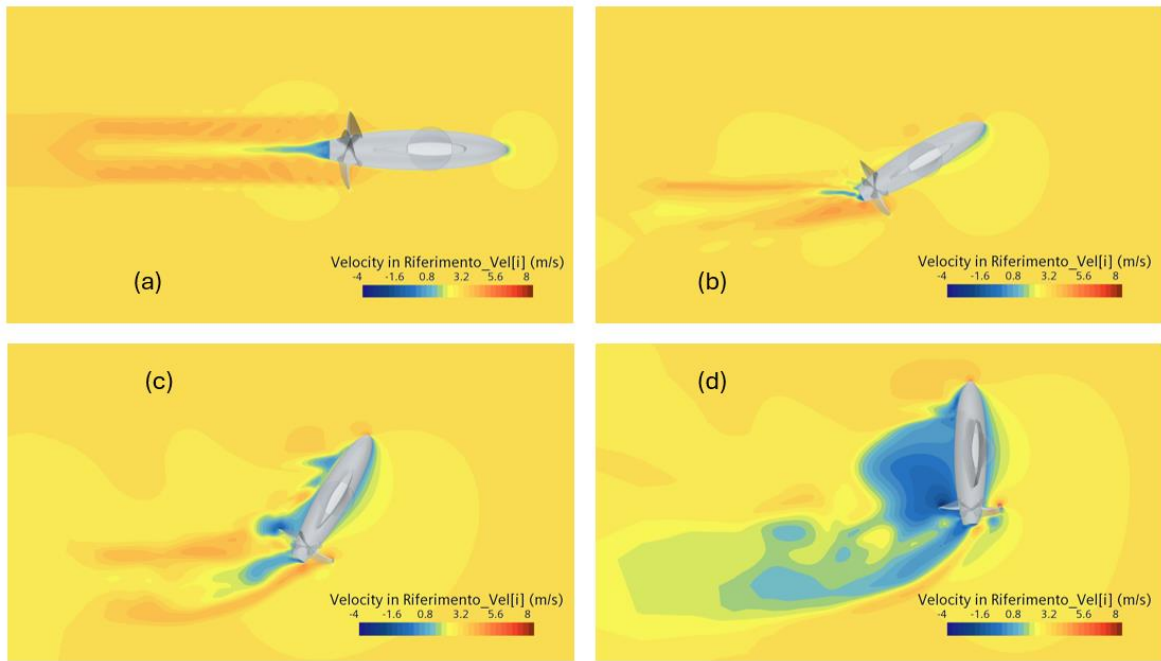


Figura 74.  $V_x$  nel piano  $Z = 0$  per  $\psi$  pari a: (a)  $0^\circ$ , (b)  $30^\circ$ , (c)  $60^\circ$ , (d)  $90^\circ$ .

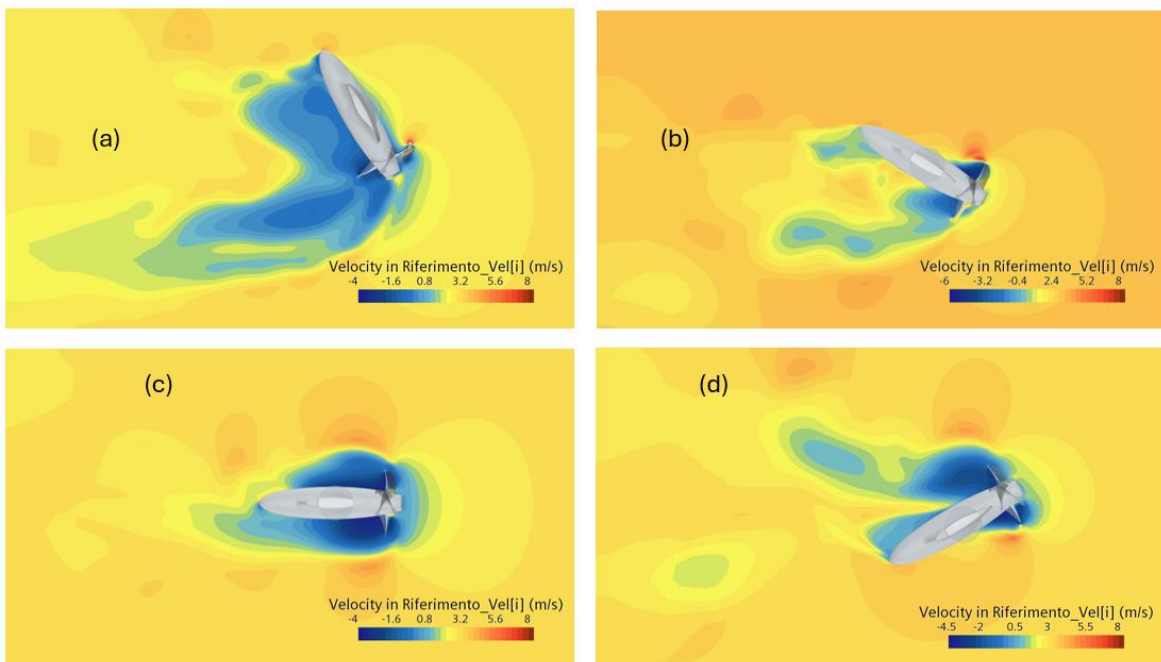


Figura 75.  $V_x$  nel piano  $Z = 0$  per  $\psi$  pari a: (a)  $120^\circ$ , (b)  $150^\circ$ , (c)  $180^\circ$ , (d)  $210^\circ$ .

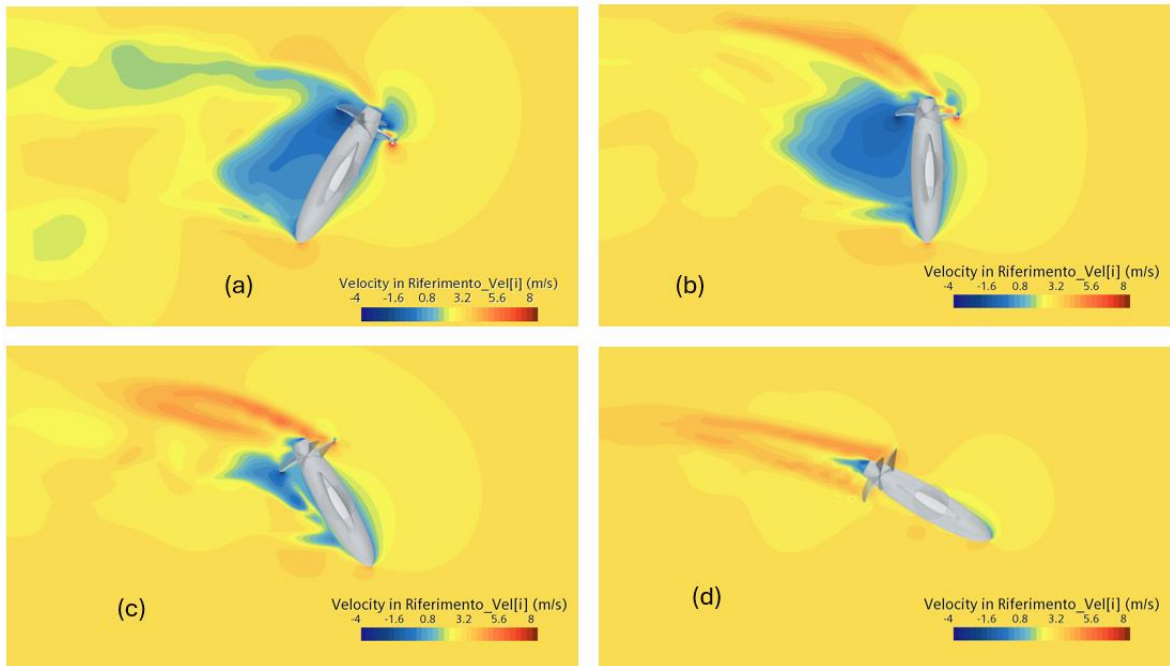


Figura 76.  $V_x$  nel piano  $Z = 0$  per  $\psi$  pari a: (a)  $240^\circ$ , (b)  $270^\circ$ , (c)  $300^\circ$ , (d)  $330^\circ$ .

Osservando le figure soprastanti si può notare che:

- Per  $0^\circ < \psi < 90^\circ$  e  $270^\circ < \psi < 360^\circ$  l'elica accelera il flusso verso la poppa di dell'ipotetica nave a cui è collegato;
- Per  $90^\circ < \psi < 180^\circ$  e  $180^\circ < \psi < 270^\circ$  l'elica accelera il flusso verso la prua dell'ipotetica nave a cui è collegato. Le velocità diventano prevalentemente negative intorno al pod in quanto le particelle tendono a tornare indietro rispetto alla direzione dalla quale provengono;
- Essendo l'elica sempre destrorsa, il campo di moto fluido non è perfettamente simmetrico. Questo si osserva se si confronta ciò che succede per il range di angoli di azimuth da  $0^\circ$  a  $180^\circ$  con ciò che avviene per il range da  $180^\circ$  a  $360^\circ$ .

## 5. Analisi delle azioni sulla struttura del Pod

In questa sezione vengono riportati i risultati ottenuti da una serie di simulazioni condotte per indagare le azioni agenti sulla struttura del pod, costituita dalle due porzioni di mozzo (*Pull* e *Push*), dalla gondola e dal piede, al variare dell'angolo di azimuth  $\psi$ .

In particolare, le simulazioni sono state effettuate impostando un valore del coefficiente d'avanzo  $J$  pari a 0.847, a cui corrisponde una velocità indisturbata costante pari a 2.79 m/s, con cui il flusso investe la struttura del pod priva di elica.

Gli angoli di azimuth indagati sono gli  $\psi$  da  $0^\circ$  a  $360^\circ$ , con range pari a  $30^\circ$ .

I risultati vengono riportati sotto forma di coefficienti adimensionali delle tre componenti della forza agente sulla struttura, comprensiva di mozzo, gondola e pod,  $F_x$ ,  $F_y$  e  $F_z$  al variare dell'angolo di azimuth. Inoltre, si riporta il coefficiente adimensionale della componente  $z$  del momento totale agente sulla struttura del pod al variare dell'angolo di azimuth.

I coefficienti adimensionali sono definiti nel modo seguente:

$$K_{Fi} = \frac{F_i}{\rho n^2 D^4}$$

$$K_{Mi} = \frac{M_i}{\rho n^2 D^5}$$

Dove  $n$  è il numero di giri dell'elica pari a 15 rps.

Le componenti di forza e i momenti sono calcolati nel sistema di riferimento fisso e il valore riportato è quello mediato sugli ultimi 360 step temporali di simulazione.

Si riportano solamente i risultati ottenuti dalla simulazione Non-Stazionaria.

Lo scopo di quest'analisi è evidenziare la differenza che sussiste tra il propulsore con elica e privo di elica, dal punto di vista delle azioni agenti sulla struttura.

Questo può essere utile in fase di dimensionamento degli organi di governo, in quanto una simulazione CFD, tempo variante e priva di elica richiede un onere computazionale inferiore.

$\psi$ [°]	K_Fx	K_Fy	K_Fz	K_Mz
0°	-0.011	0.001	-0.032	0.000
30°	-0.138	0.225	-0.150	0.079
60°	-0.328	0.222	-0.246	0.066
90°	-0.379	0.054	-0.204	-0.011
120°	-0.285	-0.102	-0.193	-0.088
150°	-0.143	-0.126	-0.164	-0.087
180°	-0.014	0.001	-0.032	0.000
210°	-0.142	0.126	-0.164	0.087
240°	-0.286	0.103	-0.194	0.088
270°	-0.370	-0.048	-0.210	0.019
300°	-0.327	-0.222	-0.244	-0.066
330°	-0.139	-0.225	-0.151	-0.078
360°	-0.011	0.001	-0.032	0.000

Tabella 36. Coefficienti adimensionali mediati espressivi delle forze ai diversi angoli di azimuth.

A livello teorico, i valori sopra riportati sono simmetrici totalmente 0°-180° e 180°-360°.

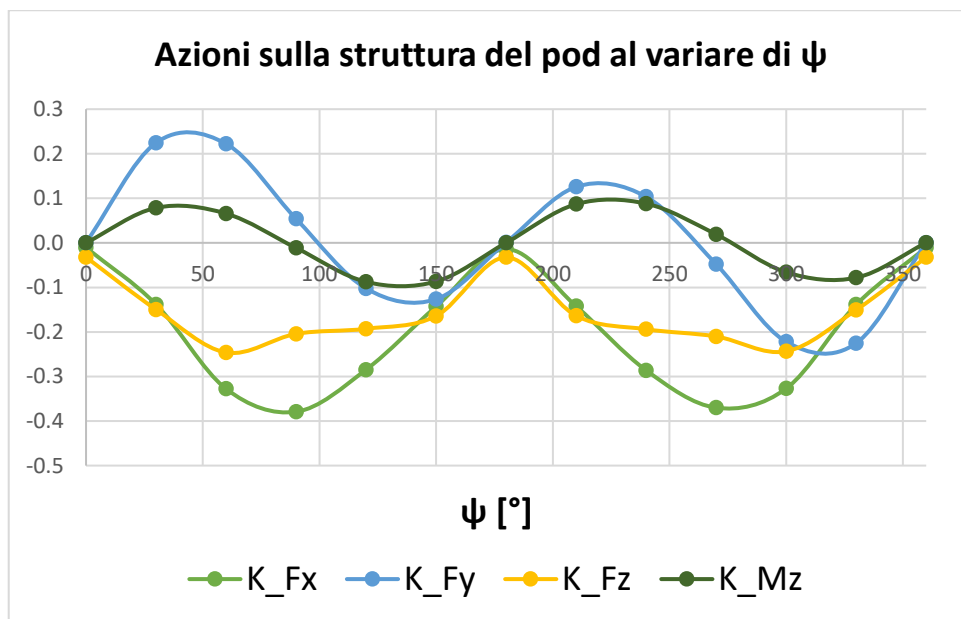


Grafico 29. Coefficienti adimensionali, mediati, per  $\psi$  da 0° a 360°.

Essendo la gondola quasi simmetrica poppa-prora, a meno di differenze per quanto riguarda la forma dei due mozzi, l'andamento dei coefficienti, al variare dell'angolo di rotazione del pod, è quasi simmetrico.

## 6. Analisi delle prestazioni con *Virtual Disk*

In questa sezione si riportano i risultati delle simulazioni condotte implementando il modello di disco attuatore al posto dell'elica al variare dell'angolo di azimuth.

Si presentano, in forma grafica e tabulare, i coefficienti adimensionali rappresentativi delle azioni espresse dal disco e agenti sulla struttura del pod, mediati sui sotto-step temporali dell'ultimo "giro", virtuale, effettuato dall'elica modellata con disco attuatore.

In particolare, si illustreranno di seguito i dati, al variare dell'angolo di azimuth, in termini di:

- Componenti della risultante delle forze agenti sulla struttura  $F_x$ ,  $F_y$  e  $F_z$  e adimensionalizzate come fatto nel paragrafo precedente;
- Componente lungo z del momento risultante sulla struttura  $M_z$  adimensionalizzata come fatto precedentemente;
- Coefficienti di spinta, nelle tre direzioni, e di coppia espressi dal disco e coefficiente d'avanzo espresso realmente dal disco.

Si ricorda che il parametro di input che deve essere inserito nel modello di disco è il numero di giri  $n = 15$  rps; con esso, tramite il criterio di *Goldstein*, vengono calcolate spinta e coppia espresse dal disco in funzione delle velocità indotte sul *Sampled Velocity Plane*. In seguito, si calcolano le risultanti delle forze assiali, radiali e tangenziali espresse realmente dal disco che risultano essere le componenti nelle tre direzioni cartesiane della spinta.

L'analisi è stata condotta considerando una configurazione propulsiva di tipo *Pull* per valori di  $\psi$  da  $0^\circ$  a  $360^\circ$  con un range pari a  $30^\circ$ ; quindi, con elica posta a proravia del supporto e ipotizzando una velocità indisturbata pari a  $2.79$  m/s ottenuta a partire dal coefficiente d'avanzo di progetto  $J = 0.847$ .

Qui di seguito si illustrano i risultati, in forma tabulare e grafica, sotto forma di coefficienti adimensionali mediati, nel paragrafo successivo si evidenzieranno le differenze tra questo modello e quello complessivo di elica

## 6.1 Coefficienti adimensionali mediati

I valori forniti sono esclusivamente quelli ottenuti dalla soluzione di tipo *Implicit Unsteady*.

$\psi$ [°]	K_Fx	K_Fy	K_Fz	K_Mz
0°	-0.021	-0.028	-0.039	-0.017
30°	-0.143	0.235	-0.235	0.102
60°	-0.408	0.291	-0.456	0.074
90°	-0.502	0.093	-0.364	0.005
120°	-0.334	-0.066	-0.253	-0.083
150°	-0.159	-0.154	-0.128	-0.089
180°	-0.027	0.015	-0.005	-0.004
210°	-0.216	0.283	-0.050	0.045
240°	-0.403	0.095	-0.176	0.061
270°	-0.477	-0.070	-0.165	-0.011
300°	-0.427	-0.288	-0.079	-0.087
330°	-0.160	-0.309	-0.019	-0.125
360°	-0.021	-0.028	-0.039	-0.017

Tabella 37. Coefficienti adimensionali mediati espressivi delle azioni agenti sul pod per configurazioni ruotate del pod da 0° a 360°.

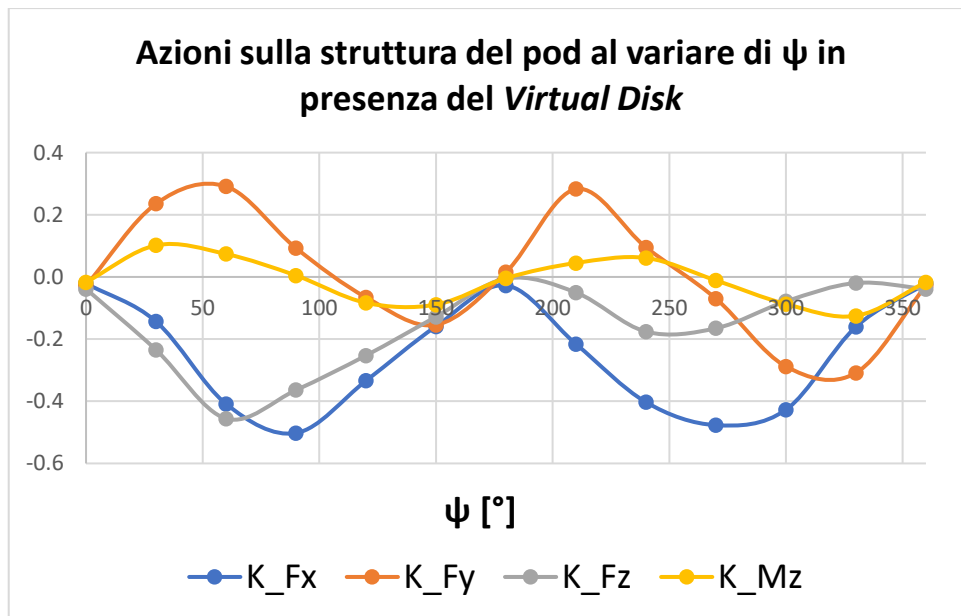


Grafico 30. Coefficienti adimensionali, mediati, per  $\psi$  da 0° a 360°.

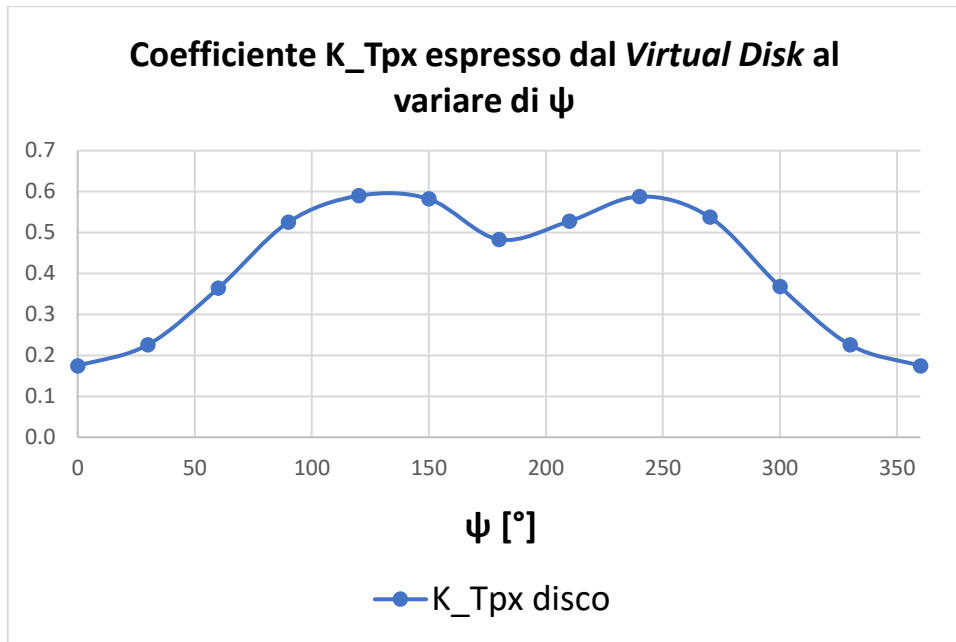


Grafico 31.  $K_{Tpx}$  espressi dal disco, mediati, per  $\psi$  da  $0^\circ$  a  $360^\circ$ .

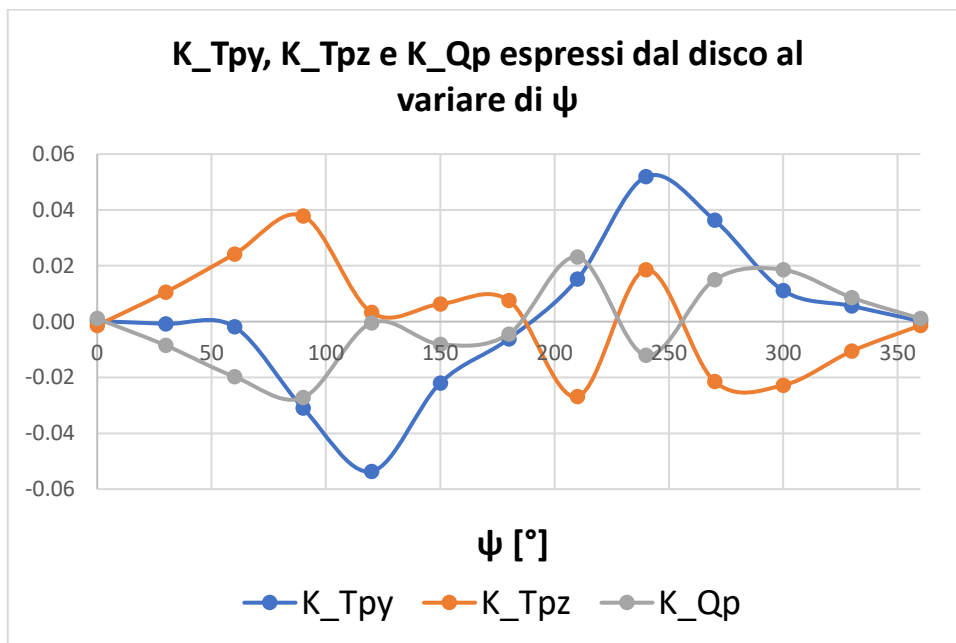


Grafico 32.  $K_{Tpy}$ ,  $K_{Tpz}$  e  $K_{Qp}$  espressi dal disco, mediati, per  $\psi$  da  $0^\circ$  a  $360^\circ$ .

I coefficienti rappresentativi delle azioni espresse dal disco lungo y, lungo z e il coefficiente di coppia sono riportati separati rispetto a  $K_{Tpx}$  in quanto valori inferiori dell'ordine di  $10^{-1}$ .

## 7. Confronto tra modelli

In questa sezione, al fine di evidenziare le differenze che si hanno tra il modello completo di elica rotante (soluzione non stazionaria) e i modelli semplificati illustrati precedentemente, si confrontano i valori dei coefficienti adimensionali, mediati sull'ultimo giro compiuto dall'elica, al variare dell'angolo di rotazione del pod  $\psi$  da  $0^\circ$  a  $360^\circ$  con un range pari a  $30^\circ$ . Le simulazioni sono state effettuate a parità di  $J = 0.847$  e di  $n = 15$  rps, a cui corrisponde una velocità indisturbata costante del campo di moto fluido pari a  $2.79$  m/s.

Nello specifico, verranno evidenziati i seguenti confronti:

- Confronto dal punto di vista di  $F_x$ ,  $F_y$ ,  $F_z$  e  $M_z$ , adimensionalizzati, al variare di  $\psi$  per quanto riguarda le soluzioni di tipo Non-Stazionario ottenute dai tre modelli via via più semplici: completo di elica rotante, con disco attuatore e privo di organo rotante;
- Confronto dal punto di vista di  $T_x$ ,  $T_y$ ,  $T_z$  e  $Q_p$ , adimensionalizzati, al variare di  $\psi$  per quanto riguarda le soluzioni di tipo Non-Stazionario ottenute dai tre modelli via via più semplici: completo di elica rotante, con disco attuatore e con elica bloccata (soluzione MRF);
- Confronto dal punto di vista del campo di moto risultante, nella sua componente assiale  $V_x$  espresso dai modelli non stazionari di disco attuatore e di propulsore azimutale completo con elica, per  $\psi$  pari a  $0^\circ$ ,  $90^\circ$ ,  $180^\circ$ ,  $270^\circ$ .

### 7.1 Confronto azioni risultanti sulla struttura del pod espresse dai diversi modelli utilizzati

Di seguito si evidenziano le differenze, dal punto di vista delle tre componenti della forza risultante e del momento attorno all'asse z agenti sulla struttura del pod (gondola e piede) al variare dell'angolo di azimuth nel sistema di riferimento fisso.

I risultati sono riportati in forma di coefficienti adimensionali mediati ottenuti dai seguenti modelli implementati: modello completo con elica rotante, modello con disco attuatore al posto dell'elica e modello privo di organo rotante; si evidenzia che i risultati riportati sono solo quelli della soluzione Non-Stazionaria.



Si ricorda che le componenti risultanti sulla struttura ( $F_x$ ,  $F_y$ ,  $F_z$ ) e il momento  $M_z$  sono adimensionalizzati così:  $K_{F_i} = \frac{F_i}{\rho n^2 D^4}$  e  $K_{M_i} = \frac{M_i}{\rho n^2 D^5}$ , dove  $n$  è il numero di giri dell'elica pari a 15 rps e  $D$  è il diametro dell'elica pari a 0.22 m.

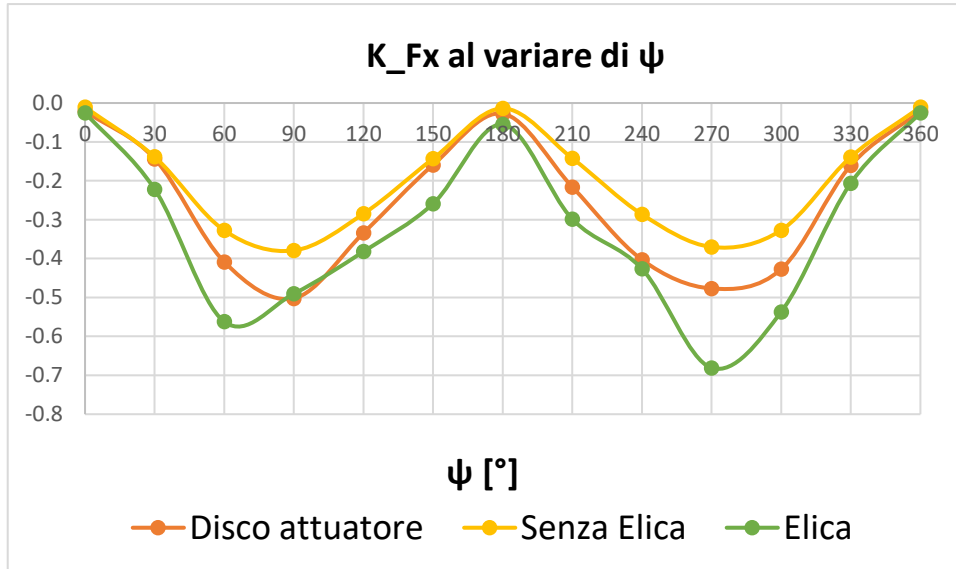


Grafico 33.  $K_{F_x}$  espresso secondo i tre diversi modelli impiegati per  $\psi$  da  $0^\circ$  a  $360^\circ$ .

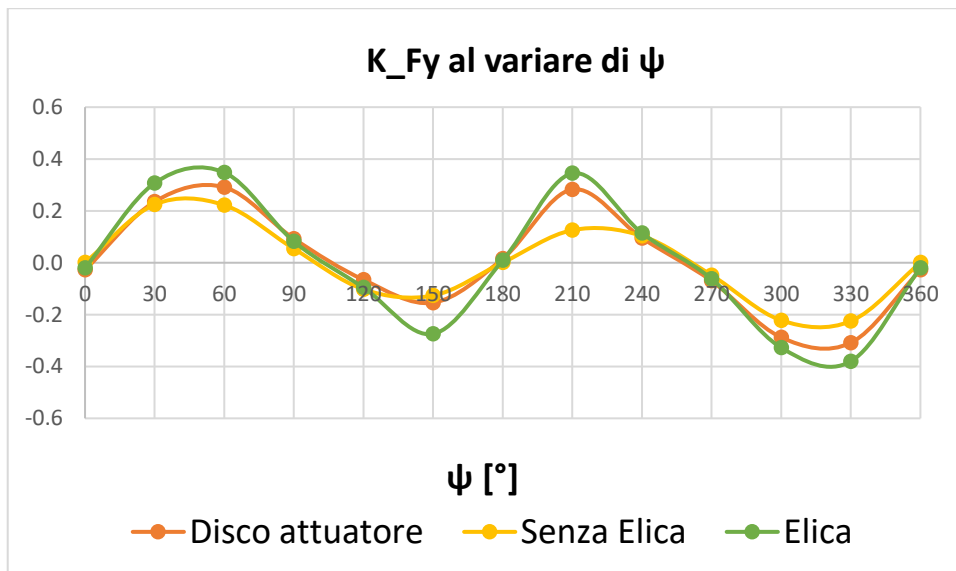


Grafico 34.  $K_{F_y}$  espresso secondo i tre diversi modelli impiegati per  $\psi$  da  $0^\circ$  a  $360^\circ$ .

Considerando i tre modelli, si può osservare che il modello con disco attuatore sta a metà tra quello completo non stazionario e quello MRF.

Rispetto a quello MRF riesce ad avvicinarsi di più al modello completo per quanto riguarda le forze agenti sulla struttura. Effettuando una stima percentuale sull'errore compiuto, un

modello con *Virtual Disk* potrebbe essere usato per un'ipotetica applicazione di manovrabilità, evitando di effettuare simulazioni onerose dal punto di vista dell'onere computazionale.

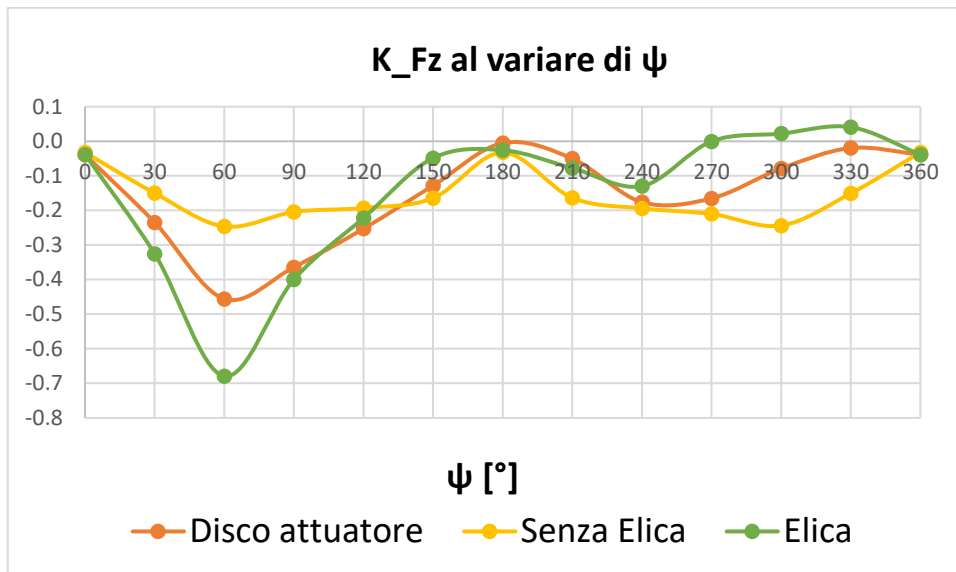


Grafico 35.  $K_{Fz}$  espresso secondo i tre diversi modelli impiegati per  $\psi$  da  $0^\circ$  a  $360^\circ$ . Non si riporta, nei tre grafici precedenti, il valore sperimentale ottenuto dalle prove in vasca in quanto non viene fornito tale valore dagli esperimenti. I  $K_{Ti}$  illustrati nei paragrafi precedenti sono rappresentativi delle forze totali agenti sulla struttura, dunque comprendono anche l'elica. Essendo difficile scorporare i contributi della struttura e dell'elica a causa dei sistemi di misurazione utilizzati negli esperimenti, si omette il valore di  $K_{Fi}$  ottenuto sperimentalmente in vasca.

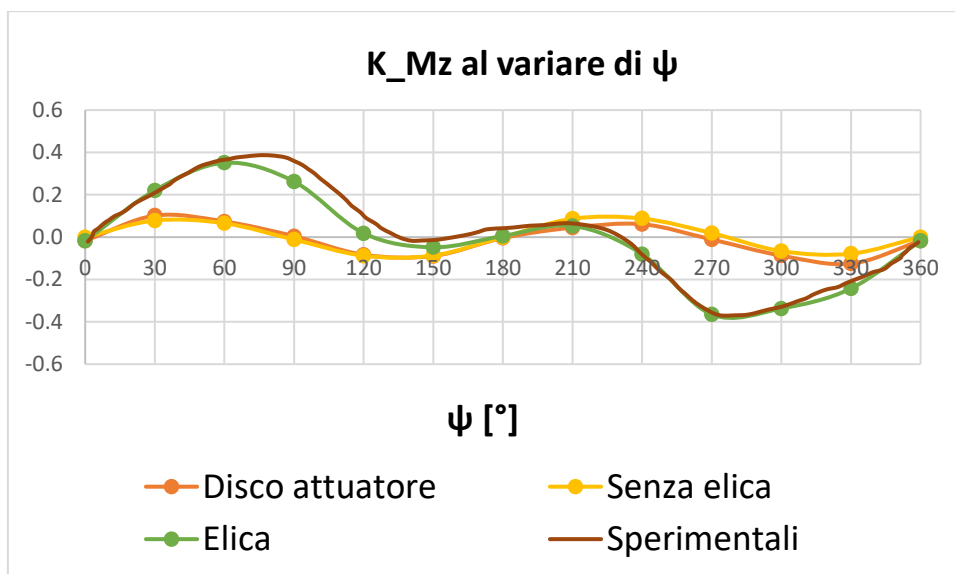


Grafico 35.  $K_{Mz}$  espresso secondo i tre diversi modelli impiegati per  $\psi$  da  $0^\circ$  a  $360^\circ$  e rapportati anche al valore sperimentale.

Come si può osservare dal grafico sopra, unico rispetto ai tre precedenti dove si riporta anche il valore sperimentale essendo disponibile nel paper, i valori espressi dai modelli semplificati sono ben lontani da ciò che si è ottenuto realmente negli esperimenti.

In ogni caso si osserva che il contributo principale al momento  $M_z$  è dovuto alle forze trasversali dell'elica. Infatti, i modelli semplificati, quali il disco e quello privo di elica, presentano valori molto inferiori, in termini di  $K_{Mz}$ , rispetto a quelli del modello completo e rispetto al valore sperimentale.

## **7.2 Confronto su spinta e coppia espresse dai diversi modelli utilizzati**

Di seguito si evidenziano le differenze, dal punto di vista delle tre componenti della spinta e della coppia espresse dall'elica al variare dell'angolo di azimuth nel sistema di riferimento ruotato.

I risultati sono riportati in forma di coefficienti adimensionali mediati ( $K_{Tp}$ ,  $K_{Fyp}$ ,  $K_{Fzp}$  e  $K_{Qp}$ ) ottenuti dai seguenti modelli implementati: modello completo con elica rotante, modello con disco attuatore al posto dell'elica; si evidenzia che i risultati riportati sono solo quelli della soluzione Non-Stazionaria e vengono confrontati anche con il dato sperimentale di partenza e con il modello con elica ferma stazionario (soluzione MRF), essendo quest'ultimo un modello più semplice rispetto a quello completo rotante e quindi potenzialmente valido in certe configurazioni.

Inoltre, per completezza, si riportano i risultati anche in forma di coefficienti adimensionali mediati delle tre componenti di spinta esprimibili dall'elica, sempre considerando i tre diversi modelli impiegati: soluzione Non-Stazionaria, disco attuatore (non stazionario), elica bloccata (soluzione MRF stazionaria).

Questo in quanto i coefficienti adimensionali  $K_{Fyp}$  e  $K_{Fzp}$  non rappresentano nella forma più pura possibile i contributi risultanti nel piano ZY della spinta offerta dall'elica, essendo essi il risultato di un rapporto.

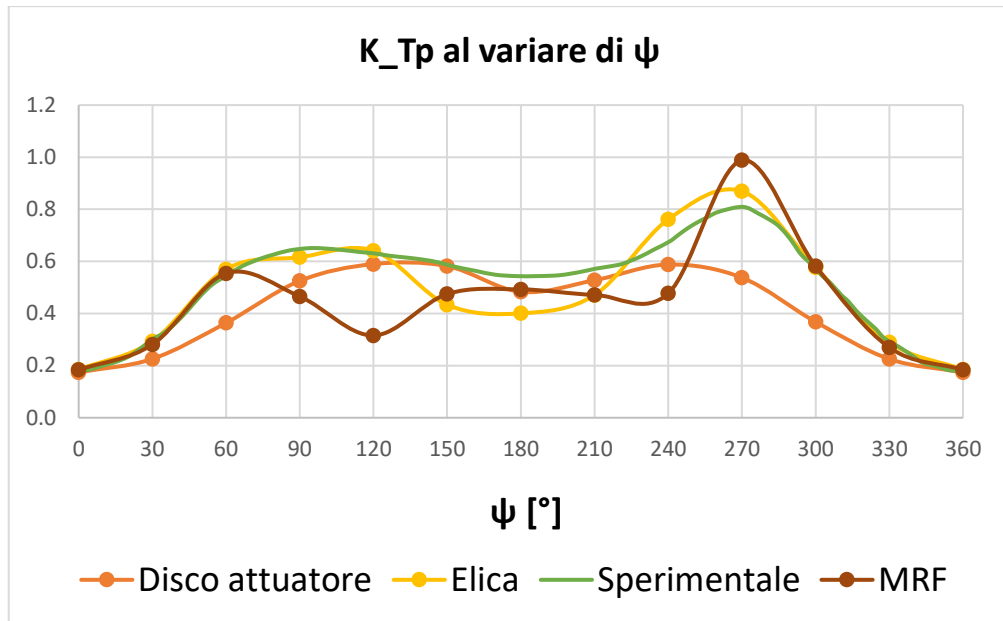


Grafico 35.  $K_{Tp}$  espresso dai diversi modelli e rapportato al dato sperimentale al variare di  $\psi$  da  $0^\circ$  a  $360^\circ$ .

Si può vedere come il disco attuatore sia un valido sostituto del modello con elica rotante non stazionario completo per un range di angoli da  $125^\circ$  a  $210^\circ$ . Per gli altri angoli risulta preferibile persino utilizzare il modello stazionario MRF con elica bloccata.

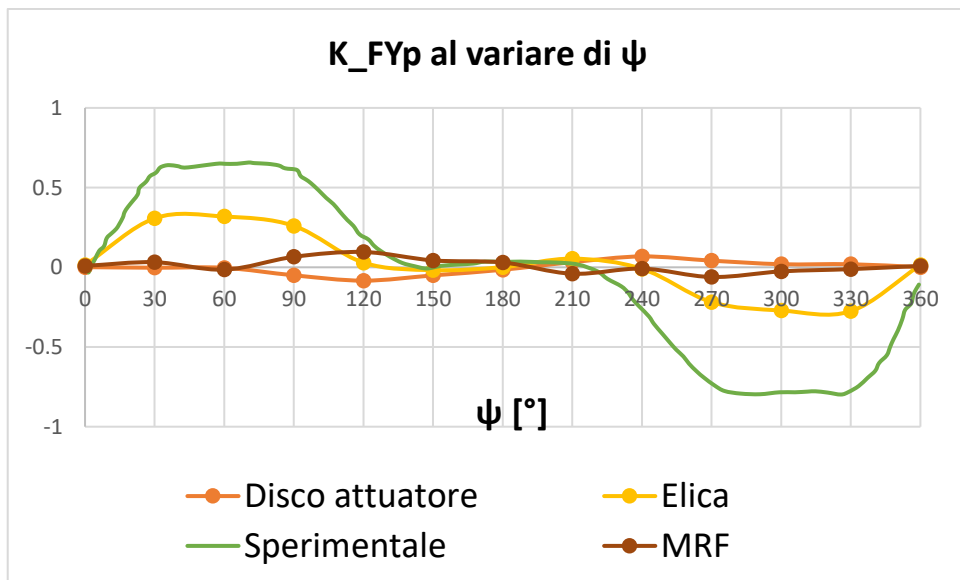


Grafico 36.  $K_{FYp}$  espresso dai diversi modelli e rapportato al dato sperimentale al variare di  $\psi$  da  $0^\circ$  a  $360^\circ$ .

Si osserva che, per quanto riguarda  $K_{FYp}$  il solo modello con elica rotante non stazionario risulta adatto ad osservare, almeno in linea approssimativa, il comportamento del propulsore.

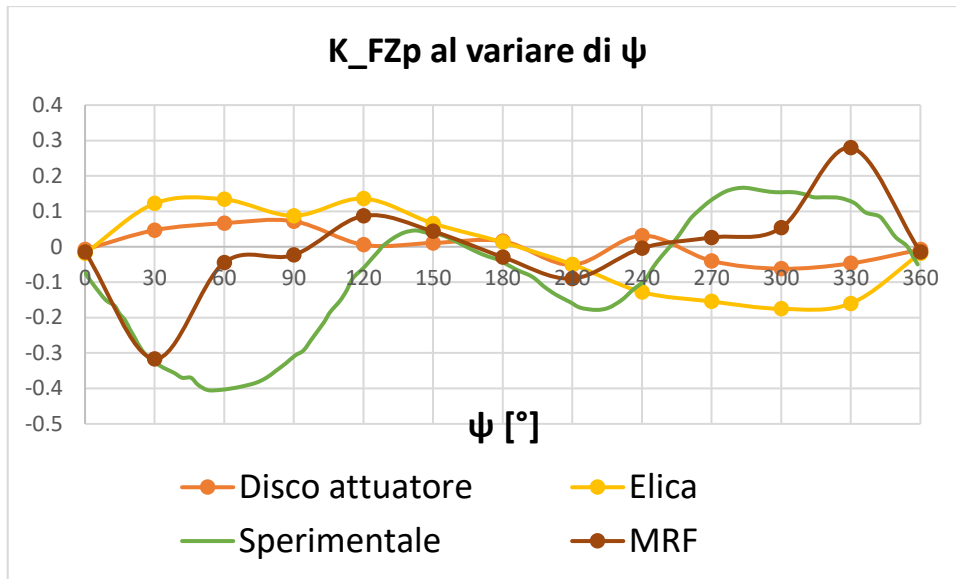


Grafico 37.  $K_{FZp}$  espresso dai diversi modelli e rapportato al dato sperimentale al variare di  $\psi$  da  $0^\circ$  a  $360^\circ$ .

Analogamente a quanto successo per  $K_{FYp}$ , anche per quanto riguarda  $K_{FZp}$  risulta difficile studiare il comportamento del propulsore. Il modello più semplice di tutti, ovvero quello stazionario MRF con elica bloccata, è il solo in grado di avvicinarsi al dato sperimentale, ma solo per determinati angoli.

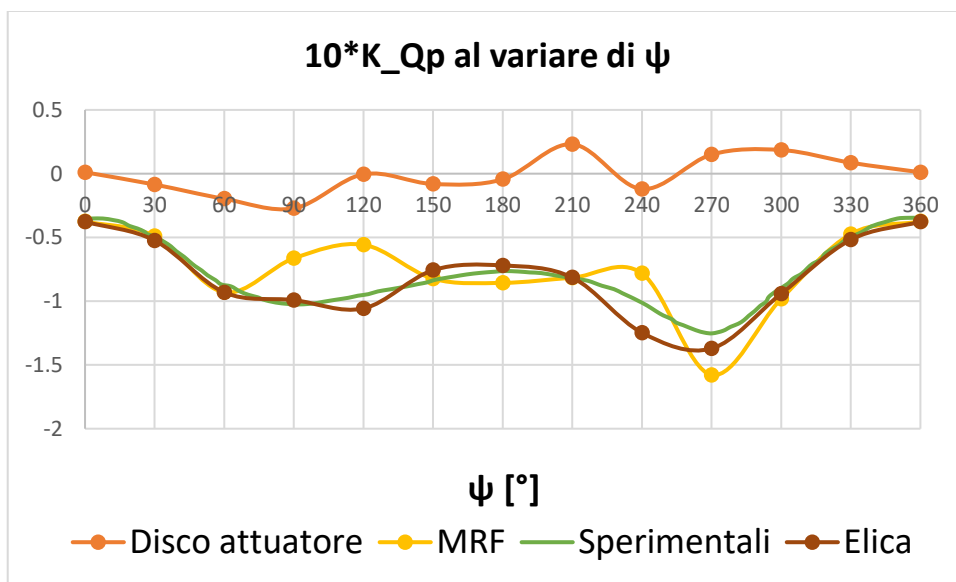


Grafico 37.  $K_{Qp}$  espresso dai diversi modelli e rapportato al dato sperimentale al variare di  $\psi$  da  $0^\circ$  a  $360^\circ$ .

Si osserva come, per quanto riguarda  $K_{Qp}$  il modello con il disco attuatore, per come è stato impostato, risulti totalmente inadatto a simulare il fenomeno in esame.

Qui di seguito si riportano i coefficienti adimensionali rappresentativi delle componenti lungo y e lungo z della spinta espressa secondo i tre modelli utilizzati per rappresentare il fenomeno.

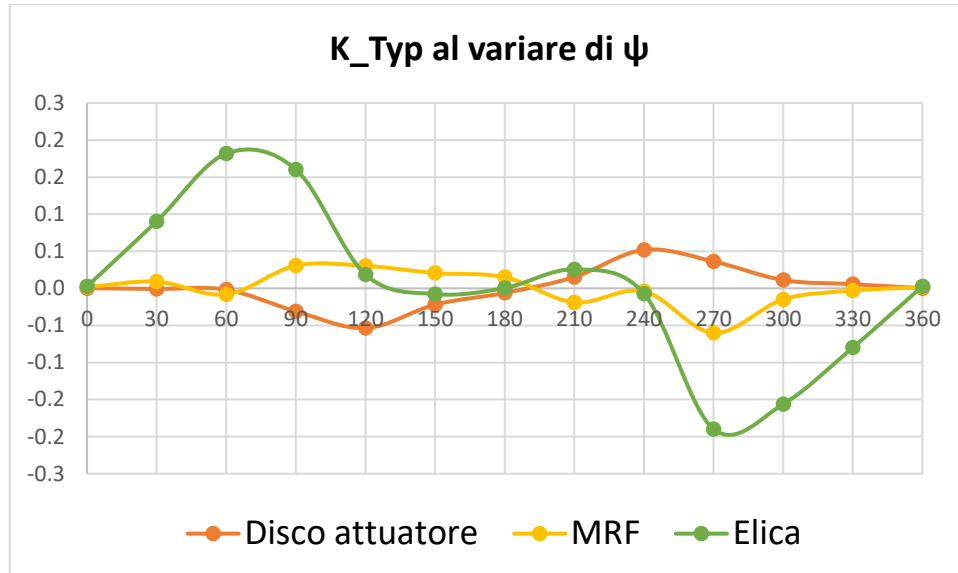


Grafico 37.  $K_{Typ}$  espresso dai tre modelli impiegati al variare di  $\psi$  da 0° a 360°.

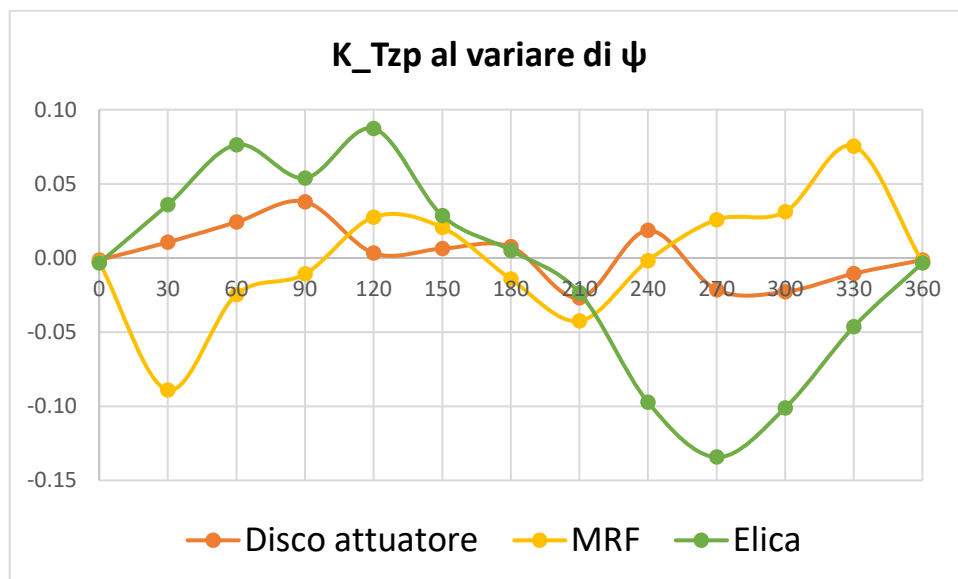


Grafico 37.  $K_{Tzp}$  espresso dai tre modelli impiegati al variare di  $\psi$  da 0° a 360°.

Si osserva che: mentre per quanto riguarda  $K_{Typ}$  il modello con disco attuatore risulta inadeguato a rappresentare la spinta in direzione y, dal punto di vista della componente lungo z invece, si avvicina, perlomeno dal punto di vista dell'andamento, alla soluzione non stazionaria completa di elica.

### 7.3 Campo di moto $V_x$ espresso dal modello con *Virtual Disk* e modello completo di elica

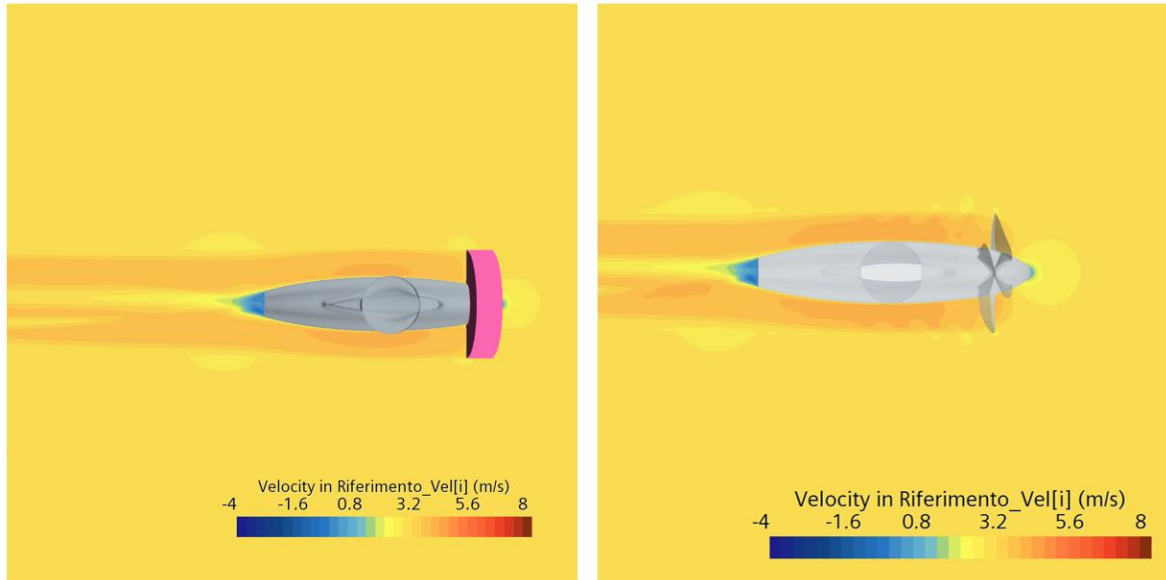


Figura 77. Componente  $V_x$  del campo di velocità nel piano  $Z = 0$  per  $\psi$  pari a  $0^\circ$ .

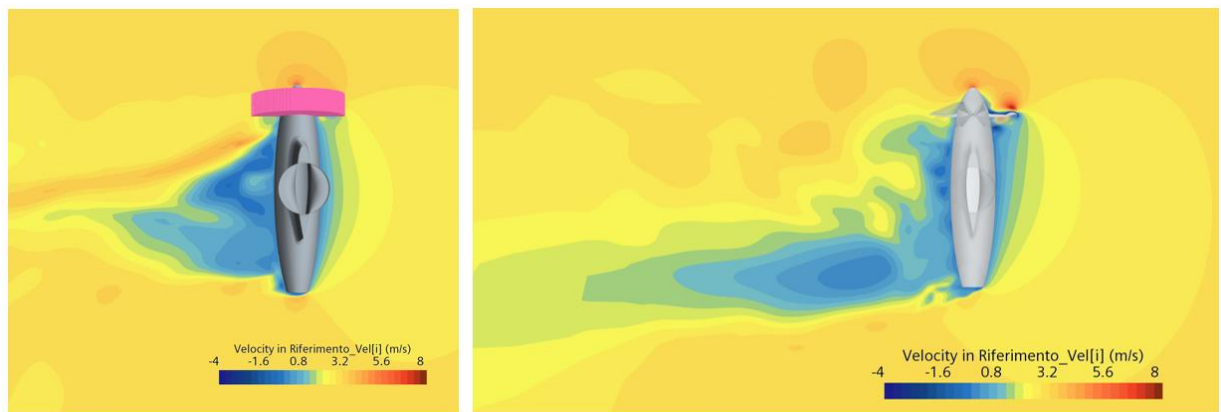


Figura 78. Componente  $V_x$  del campo di velocità nel piano  $Z = 0$  per  $\psi$  pari a  $90^\circ$ .

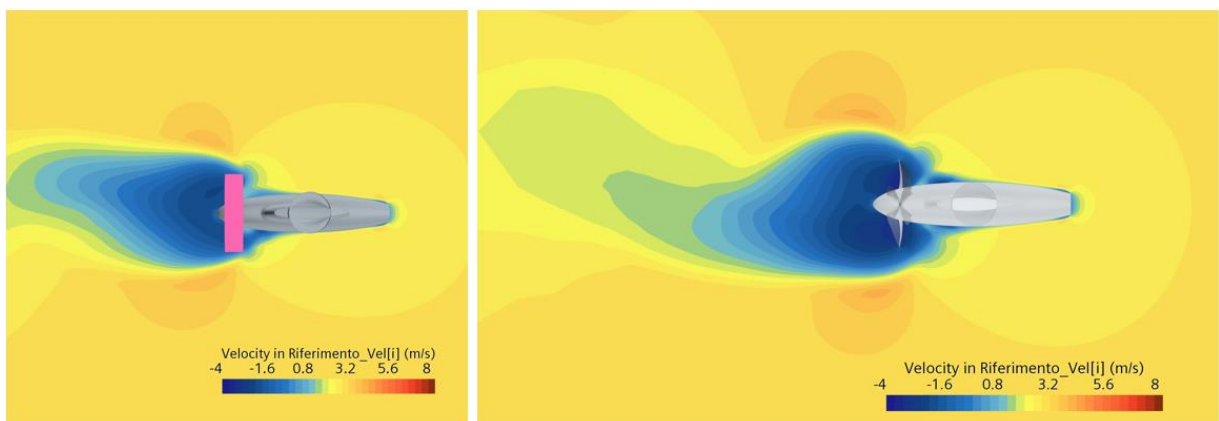


Figura 79. Componente  $V_x$  del campo di velocità nel piano  $Z = 0$  per  $\psi$  pari a  $180^\circ$ .

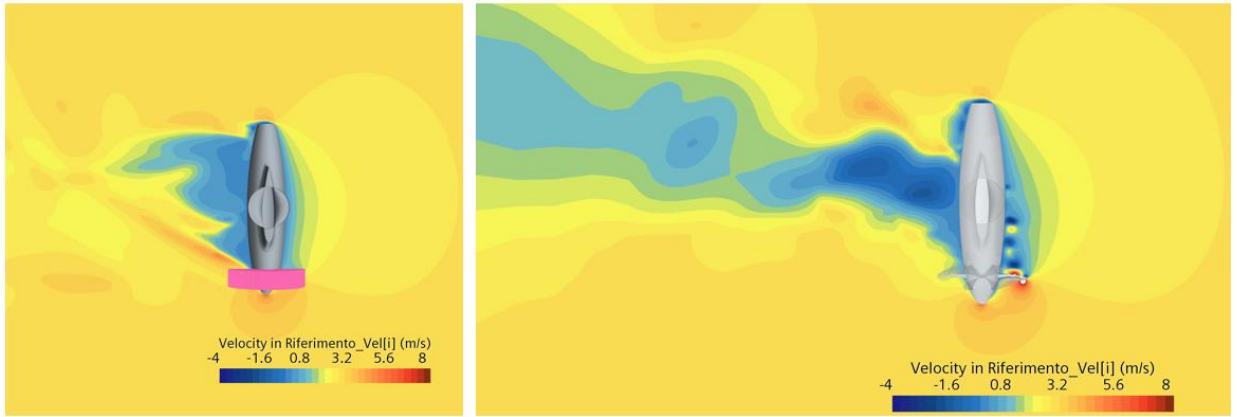


Figura 80. Componente  $V_x$  del campo di velocità nel piano  $Z = 0$  per  $\psi$  pari a  $270^\circ$ .



# Conclusioni e Sviluppi Futuri

Alla luce dei risultati espressi dalle analisi condotte, riportati nel precedente capitolo, si possono trarre una serie di conclusioni utili per eventuali studi futuri.

## 1. Conclusioni

In questa tesi, come dichiarato più volte, ci si è prefissati di indagare le performance che è in grado di esprimere un propulsore azimutale in configurazioni di flusso obliquo stazionarie. Nello specifico, sono state analizzate delle configurazioni di tipo *Pull* (con elica a proravia) e *Push* (con elica a poppavia) al variare dell'angolo di rotazione del pod attorno all'asse  $z$ ,  $\psi$ , per un range di angoli da  $0^\circ$  a  $360^\circ$ .

Le simulazioni sono state condotte impostando i seguenti valori costanti: numero di giri dell'elica (15 rps), geometria dell'elica e della struttura (D pari a 0.22 m e numero di pale pari a 4), coefficiente d'avanzo  $J$  (0.847) e senso di rotazione dell'elica (destrorsa).

Lo scopo principale della campagna condotta è stato quello di avvicinarsi il più possibile ai risultati sperimentali ottenuti in vasca da Heinke et al. (2004).

In seguito ai risultati ottenuti, sono state indagate le azioni agenti sulla struttura del pod e le prestazioni fornibili dall'elica implementando, e confrontando, modelli di calcolo via via più semplici quali: il modello di pod privo di elica e il modello con disco attuatore al posto dell'elica.

In questo paragrafo si ripercorrono brevemente i passi condotti per ottenere i risultati, al fine di evidenziare ciò che si è ottenuto.

### 1.1 Analisi di Convergenza

È stata condotta implementando una serie di simulazioni volte a individuare la dimensione massima delle celle appartenenti alle due mesh di calcolo.

Variando da simulazione a simulazione la base size, e da caso a caso l'angolo di azimuth, per una configurazione di tipo *Pull* con  $J = 0.847$ , sono stati messi in luce i seguenti aspetti:

- Per angoli di azimuth pari a  $0^\circ$  e  $45^\circ$  ci sia avvicina molto ai valori dei coefficienti adimensionali, rappresentativi delle performance dell'elica, ottenuti in vasca.  
Si possono notare differenze dell'ordine di  $10^{-2}$  per quanto riguarda i coefficienti rappresentativi delle azioni lungo y e z in termini di valore assoluto;
- Per  $\psi$  pari a  $90^\circ$  le differenze aumentano fino a  $10^{-1}$ , evidenziando una difficoltà nell'avvicinarsi al dato sperimentale per configurazioni azimutali caratterizzate dall'insorgere di elevati fenomeni turbolenti generati dal buco di scia creato a valle del pod in seguito al posizionamento critico rispetto al flusso;
- Una base size di 0.18 m, sia per la mesh *Trimmer* che per quella *Poliedrica*, risulta sufficientemente appropriata al fine di studiare i fenomeni oggetto delle analisi successive.

## 1.2 Analisi a $\psi = 0^\circ$ in configurazione *Pull* e *Push*

Condotta fissando l'angolo di azimuth pari a  $0^\circ$ , per cinque valori del coefficiente d'avanzo  $J \{0.65, 0.75, 0.847, 0.90, 1.00\}$ , per una configurazione propulsiva sia di tipo *Pull* che *Push*, quest'analisi ha evidenziato come il modello sia sufficientemente accurato per estrarre i corretti valori di spinta e coppia adimensionalizzate che è in grado di fornire l'elica.

Dal confronto condotto coi dati sperimentali, si evidenziano differenze dell'ordine di  $10^{-3}$  per quanto riguarda  $K_{Tp}$  e  $K_{Qp}$  espressi in configurazione *Push*, questo a causa della presenza della struttura del pod a proravia dell'elica che causa un buco di scia sufficiente a far divergere il risultato da quello sperimentale.

## 1.3 Analisi in configurazione *Pull*

Condotta per tre valori del coefficiente d'avanzo  $J \{0.75, 0.847, 0.90\}$  per angoli di azimuth da  $0^\circ$  a  $360^\circ$  con un range pari a  $30^\circ$ , quest'analisi ha evidenziato i seguenti aspetti:

- Confrontando gli otto coefficienti adimensionali, mediati nel tempo, caratteristici delle prestazioni del propulsore azimutale ( $K_{Tp}$ ,  $K_{FYP}$ ,  $K_{FZP}$ ,  $K_{QP}$ ,  $K_{Tx}$ ,  $K_{Ty}$ ,  $K_{Tz}$  e

$K_{Mz}$ ) si evidenzia una difficoltà nel “catturare” realisticamente i fenomeni rilevanti per il range di angoli di azimuth da  $120^\circ$  a circa  $210^\circ$  a causa del buco di scia e delle turbolenze che si instaurano in tali configurazioni.

Tale comportamento è riscontrabile, con le dovute differenze, per la totalità dei coefficienti. Si evidenzia inoltre una forte difficoltà nell’ottenere valori simili al dato sperimentale in termini soprattutto di  $K_{FZP}$ , per il quale diventa complesso ottenere lo stesso segno rispetto al valore sperimentale ottenuto in vasca (vedi grafico 9).

Anche il valore di  $K_{FYP}$  si discosta per molti angoli da quello sperimentale. Ne segue una difficoltà, per un elevato range di angoli di azimuth, nel replicare le prestazioni fornibili dall’elica in termini di componenti trasversali della spinta;

- Le difficoltà riscontrate nel calcolo delle forze trasversali esprimibili dall’elica sono dovute alle configurazioni azimutali caratterizzate da grossi buchi di scia ed elevate turbolenze.

Un ulteriore fattore, che contribuisce a tale problematica, è legato al tempo totale di simulazione con il quale sono state indagate certe configurazioni. Questo si può osservare da un punto di vista delle **storie temporali** delle azioni espresse dall’elica, e dalla singola pala, per i tre J ai diversi  $\psi$ . Infatti, prevalentemente dai  $120^\circ$  fino ai  $210^\circ$  di angolo di azimuth, il segnale temporale della spinta nelle tre componenti non mostra un andamento pseudo-periodico sufficiente per un calcolo esatto (figure da 51 a 62).

La mancanza di periodicità del segnale, per angoli superiori a  $60^\circ/90^\circ$ , si osserva anche confrontando tale valore negli ultimi due “giri” compiuti dall’elica (figure da 63 a 68);

- Il comportamento del propulsore azimutale, al variare del coefficiente d’avanzo J, è in linea con ciò che ci si aspetta da una qualsiasi curva di elica isolata.

Al decrescere di J l’elica si “carica” maggiormente e le prestazioni che offre in termini di spinta e coppia crescono.

Da un punto di vista delle forze agenti sul pod, invece, il comportamento è opposto: con J che cresce la struttura è soggetta a forze maggiori.

## 1.4 Analisi in configurazione *Push*

Condotta per un solo valore del coefficiente d’avanzo  $J = 0.847$ , per angoli di azimuth da  $0^\circ$  a  $360^\circ$  con un range pari a  $30^\circ$ , quest’analisi ha evidenziato aspetti simili a quelli riscontrati

per il caso *Pull*. Nonostante questo, osservando i coefficienti mediati nel tempo, al variare di  $\psi$ , si mette in luce una maggiore facilità nell'ottenere valori compatibili con quelli sperimentali.

Infatti, anche per angoli di azimuth superiori a  $90^\circ$  si osservano differenze minori, rispetto al caso *Pull*, con il valore ottenuto in vasca per quanto riguarda:  $K_{TP}$ ,  $K_{Tx}$ ,  $K_{Ty}$ ,  $K_{Tz}$ ,  $K_{QP}$  e  $K_{Mz}$ . Per quanto riguarda i restanti coefficienti, l'andamento è simile a quello con elica a proravia della struttura, ma le differenze sono minori.

Solo per quanto riguarda la componente lungo y della spinta si osservano differenze non trascurabili, tra cui un cambio netto di segno (grafico 23), rispetto al valore sperimentale. Dopo i  $210^\circ$  la situazione si stabilizza.

Il campo di moto, osservando l'andamento nel piano  $Z = 0$  della componente  $V_x$  della velocità nel dominio, è simile a quello generato da una configurazione *Pull*.

Tale comportamento si ripercuote in simili valori, in modulo, dei coefficienti adimensionali caratteristici del sistema propulsivo.

## **1.5 Analisi sulla struttura del pod**

Al variare dell'angolo di azimuth da  $0^\circ$  a  $360^\circ$ , per  $J = 0.847$ , sono stati confrontati i valori dei coefficienti adimensionali caratteristici delle azioni sulla struttura del pod ottenuti da delle simulazioni effettuate mediante i tre diversi modelli impiegati per la campagna: modello completo di elica rotante non stazionario, modello con disco attuatore non stazionario e modello privo di elica non stazionario.

Osservando l'andamento rispetto a  $\psi$ , da  $0^\circ$  a  $360^\circ$ , di  $K_{Fx}$ ,  $K_{Fy}$ ,  $K_{Fz}$  e  $K_{Mz}$  si osserva un comportamento simile confrontando i valori ottenuti implementando i tre modelli.

Come è ragionevole aspettarsi, il modello completo di elica risulta sovrastimare rispetto agli altri le azioni sulla struttura del pod (gondola e piede/supporto). Questo comportamento è in linea con la realtà. Il modello di disco attuatore si posiziona a metà, tra quello completo di elica rotante e quello privo, da un punto di vista dell'efficacia nell'ottenere un valore ragionevole delle azioni sulla struttura. Può essere utilizzabile ai fini di un dimensionamento preliminare degli organi dell'apparato propulsivo.

## 1.6 Analisi di spinta e coppia

Al variare dell'angolo di azimuth da  $0^\circ$  a  $360^\circ$ , per  $J = 0.847$ , sono stati confrontati i valori dei coefficienti adimensionali mediati nel tempo caratteristici delle prestazioni esprimibili dall'elica ottenuti da delle simulazioni effettuate mediante i tre diversi modelli impiegati per la campagna: modello completo di elica rotante non stazionario, modello con disco attuatore non stazionario e modello stazionario con elica bloccata (MRF).

I risultati sono stati confrontati con il dato sperimentale e ciò ha evidenziato forti difficoltà nel replicare il comportamento esatto dell'elica mediante l'impiego del *Virtual Disk*, per come è stato definito.

L'andamento è simile a quello ottenibile dal modello completo di elica non stazionario ma i valori si discostano molto dal dato sperimentale. Il modello MRF stazionario risulta più adeguato, in certe configurazioni, a studiare le prestazioni oblique dell'elica.

Si può concludere che il modello con disco attuatore non sia sufficiente per un'analisi accurata delle prestazioni ma può essere utilizzato per avere un'idea del comportamento in manovra statica del propulsore se accoppiato con una data imbarcazione.

## 2. Sviluppi Futuri

Le analisi effettuate hanno evidenziato una validità del modello implementato per la maggior parte delle configurazioni azimutali in cui è stato indagato il sistema propulsivo.

Si osserva, però, che tali risultati sono ottenuti impostando una configurazione stazionaria del pod ai diversi  $\psi$ .

Uno sviluppo della metodologia da noi utilizzata in chiave dinamica, seguendo la rotazione nel tempo del pod attorno all'asse  $z$ , si figura come il naturale proseguimento di questo studio.

Le criticità, evidenziate, per angoli di azimuth  $\geq 90^\circ$ , nell'ottenere un riscontro positivo con il risultato sperimentale fornito, meritano di essere approfondite.

Si suggerisce di procedere cambiando i parametri caratteristici del modello CFD utilizzato: volumi di raffinamento, tipo di mesh, ecc.

Merita di essere studiato in maniera più approfondita il modello con disco attuatore, essendo la più naturale semplificazione dell'elica, in fase di calcolo, ed essendo estremamente versatile per conoscere le prestazioni fornibili anche da eliche di forma diversa da quella in oggetto.

## Bibliografia

- [1] M. Viviani, Dispense di Governo della Nave, Genova, 2022.
- [2] G. ABB.Finlandia 1991.
- [3] C. G. Y. S. P. D. a. T. J. Dagang Zhao, «Experimental Study on Hydrodynamics of L-type Podded Propulsor in Straight-ahead Motion and Off-Design Conditions,» *J. Marine Science and Engineering*, 2017.
- [4] J. M. J. H. a. L. Z. Weimin Chen, «Numerical Simulation of Hydrodynamic Performance of Podded Propulsion under Maneuvering Condition,» *Journal of Marine Science and Engineering*, 20 Aprile 2023.
- [5] D. L. Gabor Karafiath, «Pod Propulsion Hydrodynamics - U.S. Navy Experience,» Carderock, USA, 1999.
- [6] H.-J. Heinke, «INVESTIGATIONS ABOUT THE FORCES AND MOMENTS AT PODDED DRIVES,» in *First International Conference on Technological Advances in Podded Propulsion*, Newcastle, UK, 2004.
- [7] B. E. B. S. M. E. Mohammed Fakhru Islam, «Performance Study of Podded Propulsors with Varied Geometry and Azimuthing Conditions,» Newfoundland, Canada, 2009.
- [8] D. Z. C. G. a. Y. P. Wei Wang, «Analysis of Hydrodynamic Performance of L-Type Podded Propulsion with Oblique Flow Angle,» *Journal of Marine Science and Engineering*, 20 Febbraio 2019.
- [9] A. Sánchez-Caja e J. V. Pylkkänen, «On the hydrodynamic design of podded propulsors for fast commercial vessels,» in *Proceedings of 1st International Conference on Technological Advances in Podded Propulsion*, Newcastle, UK, 2004.
- [10] G. V. Paolo Blondeaux, Paolo Blondeaux, Giovanna Vittori, U. d. G. Genova, A cura di, Genova, Italia/Genova: GENOVA UNIVERSITY PRESS, 2019.
- [11] L. M. M. D. F. Moukalled, *The Finite Volume Method in Computational Fluid Dynamics*, Springer, 2015.
- [12] M. P. R. L. S. Joel H. Ferziger, *Computational Methods for Fluid Dynamics*, Springer, 2019.

- [13] L. & H. M. Eça, «A procedure for the estimation of the numerical uncertainty of CFD calculations based on grid refinement studies,» *Journal of computational physics*, n. 262, pp. 104-130, 2014.



# Ringraziamenti

Concludendo questo lavoro, desidero esprimere la mia profonda gratitudine a tutte le persone che mi hanno accompagnato lungo questo percorso.

Prima di tutto voglio ringraziare il mio relatore per avermi supportato e guidato sapientemente in questo percorso.

Un ringraziamento speciale va ai miei nonni, Rodolfo ed Elena, per avermi sempre aiutato a tenere la “barra dritta” nei momenti di difficoltà e di smarrimento. Senza di loro non sarei la persona che sono oggi, e dedico questa mia tesi a loro.

Ai miei genitori va il mio riconoscimento per avermi fatto sempre sentire il loro supporto senza mai esercitare pressioni anche quando in molti avrebbero fatto il contrario.

Ringrazio mia zia Elisabetta per avermi insegnato a sognare e mia sorella per essere la miglior complice e confidente che ci sia.

Un ringraziamento speciale va a Marta per spronarmi ogni giorno ad essere un uomo migliore. Grazie a lei ho imparato a saper realizzare tutti i miei sogni e ho capito che non esistono obiettivi impossibili.

Non posso dimenticare di ringraziare tutti gli amici che mi hanno accompagnato in tutti questi anni e che mi hanno permesso di dimenticare sofferenze e frustrazioni. In particolare, ci tengo a ringraziare la “Cumpa” per farmi sentire parte ogni giorno di una seconda famiglia.

Per concludere, un grazie particolare va a me stesso per aver sempre tenuto duro quando in molti mi consigliavano di cedere.