

# POLITECNICO DI MILANO

Scuola di Ingegneria Industriale e dell'Informazione

Dipartimento di Scienze e Tecnologie Aerospaziali

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Aeronautica



## Analisi stazionaria del primo stadio di una Turbina Centrifuga mediante griglie Chimera

Relatore: Prof. Alberto Matteo Attilio Guardone  
Co-relatore: Mirco Valentini

Tesi di Laurea di:

Sebastian BARCZYK  
Matr. 799807

Anno Accademico 2014 - 2015



## Abstract

Le turbine centrifughe sono macchine complesse sempre più in diffusione durante gli ultimi anni. Di conseguenza è di interesse lo studio di questi sistemi mediante simulazioni fluidodinamiche. Le griglie atte a risolvere flussi all'interno delle turbomacchine sono molto complicate e difficili da costruire per ottenere un risultato significativo. Esse possono essere sviluppate mediante sliding mesh o mesh Chimera. Queste ultime sono implementate nel solutore ROSITA usato nel Dipartimento di Scienze e Tecnologie Aerospaziali. Le mesh chimera sono in grado di generare una griglia finale utilizzando diverse griglie create in maniera indipendente, semplificandone il processo. Un'ulteriore complicanza è dovuta al fatto che le griglie sono in movimento relativo e l'algoritmo di creazione delle griglie deve essere utilizzato ad ogni istante di tempo. Lo scopo di questo lavoro è di compiere uno studio preliminare di uno stadio di una turbina centrifuga mediante il software ROSITA, specializzato per elicotteri, in modo da fornire un'analisi preliminare dell'adattabilità del software allo studio di turbomacchine.

**Parole chiave:** Turbine centrifughe, turbomacchine, fluidi organici, cicli O.R.C., griglie Chimera, tagging, ROSITA, griglie cerniera.



# Sommario

## Introduzione

Grazie alla diffusione di impianti ad energie rinnovabili e alla sempre maggiore esigenza di decentramento della produzione di energia (fatto che ha promosso l'utilizzo di impianti di piccola potenza), gli impianti O.R.C. (Organic Rankine Cycle) stanno avendo una rapida ascesa nel mondo della produzione di potenza risultando molto vantaggiosi in termini di costi e affidabilità. Gli impianti di tipo O.R.C. per la generazione di potenza utilizzano, al posto dell'acqua, fluidi organici come fluido di lavoro.

Lo studio delle turbine comunemente impiegate negli impianti O.R.C., vista l'insorgenza di flussi supersonici e dei relativi fenomeni dissipativi, è molto delicato e costringe il progettista a sviluppare soluzioni non convenzionali come le turbine centrifughe multistadio con flussi transonici più vantaggiose rispetto a quelle tradizionali (assiali o centripete monostadio).

Nel presente lavoro si è voluto effettuare uno studio preliminare del primo stadio di una turbina centrifuga, geometria della quale sviluppata e ottimizzata all'interno del Dipartimento di Energia del Politecnico di Milano. La turbina ha una struttura simile alla turbina di Ljungstrom ma a differenza della quale gli stadi non sono controrrotanti.

## Metodologia

Per studiare il comportamento fluidodinamico di una macchina con organi in movimento relativo le tecniche numeriche più utilizzate sono:

- **Sliding mesh:** basata sull'uso di sistemi di griglie non-conformi in moto relativo. Una superficie scorrevole può essere definita come frontiera tra le due griglie non-conformi. La comunicazione attraverso la superficie scorrevole è effettuata calcolando i flussi attraverso la frontiera di interfaccia.
- **Chimera mesh:** è una strategia di generazione della griglia per costruire sistemi di griglie sovrapposte. Questa tecnica è stata usata per la prima volta da Stegeg nel 1983 per generare griglie strutturate per geometrie complesse.

La tecnica Chimera offre elevata flessibilità per la generazione di griglie attorno a geometrie complesse e/o in movimento. L'elevata flessibilità dell'approccio è dovuta al fatto che la griglia attorno ad ogni componente della geometria può essere generata in modo indipendente. La comunicazione tra le griglie avviene nelle aree sovrapposte all'interno delle quali le celle vicino al bordo del dominio vengono interpolate usando i valori contenuti in altre celle del dominio sulle variabili di stato al centro delle celle.

Per via dei suoi vantaggi, all'interno di questo lavoro, si è deciso di utilizzare la tecnica Chimera implementata all'interno del software ROSITA (Rotorcraft Software Italy) disponibile all'interno del Dipartimento di Scienze e Tecnologie Aerospaziali del Politecnico di Milano.

## Risultati

Per studiare in dettaglio una macchina della complessità di una turbina è necessario avere una griglia sufficientemente raffinata da poter cogliere i fenomeni fluidodinamici nelle vicinanze delle schiere di palette. La densità della griglia è direttamente legata ai tempi di calcolo numerico eseguito dal solutore fluidodinamico. Di conseguenza è necessario sviluppare una griglia ottimale che permetta di avere sufficiente dettaglio al minor costo computazionale.

Il lavoro svolto mostra come il metodo Chimera, implementato all'interno del software ROSITA, sia in grado di generare una griglia composta in presenza di numerose geometrie complesse, ognuna delle quali possiede una griglia individuale.

In particolare la griglia finale è composta da 27 griglie di pale statoriche, 52 griglie di pale rotoriche, 1 griglia di background e 1 griglia di near field.

Dopo un'attento disegno delle singole griglie è stata effettuata una verifica dell'algoritmo Chimera al variare della densità di griglia e come di conseguenza cambiano i risultati fluidodinamici. Da questa verifica sarà possibile scegliere la griglia migliore, in termini di dettaglio dei risultati e di numero di celle, per poter effettuare un conto instazionario ottimizzando i tempi di calcolo in fase di sviluppo futuro di questo lavoro.

## Conclusioni e sviluppi futuri

Il lavoro svolto può essere considerato come studio preliminare di una macchina complessa con l'ausilio del software ROSITA. Il presente studio può essere usato come primo test del software ROSITA su questa tipologia di macchine e come verifica dell'efficacia della tecnica Chimera che il software implementa al suo interno.

Data l'elevata complessità della macchina gli sviluppi futuri di questa attività sono di seguito suggeriti:

- Partendo dai risultati ottenuti, sarebbe interessante vedere i risultati di una simulazione dinamica della macchina, facendo muovere la schiera rotorica rispetto alla schiera statorica per un tempo sufficiente a poter apprezzare una soluzione a regime.
- Considerando il modello di gas ideale codificato all'interno del solutore fluidodinamico ROSITA, sarebbe interessante implementare un modello di fluido più complesso per poter apprezzare il comportamento della macchina in diverse fasi nella quali opera. In particolare un impianto con le suddette caratteristiche sfrutta fluidi di tipo organico i quali si comportano come gas ideali soltanto in rari casi perché dotati di un elevato peso molecolare e di un'elevata complessità molecolare.
- Esaminando lo studio del primo stadio della turbina, il quale è l'unico stadio che permette di trascurare gli effetti tridimensionali, sarebbe interessante lo studio dell'intera macchina mediante una griglia tridimensionale complessa e l'analisi del comportamento del fluido causato dall'interazione tra gli stadi. Le schiere successive alla prima, infatti, hanno un considerevole sviluppo in direzione assiale, rendendo obbligatorio uno studio tridimensionale.

## Ringraziamenti

Prima di tutto i miei ringraziamenti vanno a coloro i quali hanno reso possibile questo lavoro di tesi; un particolare ringraziamento va quindi al Prof. A. M. A. Guardone e a M. Valentini per il tempo dedicatomi e per il loro supporto a questa attività nonostante tutte le difficoltà. Ringrazio molto anche il Prof. G. Persico del Dipartimento di Energia per aver condiviso le geometrie della turbomacchina e per il supporto nella definizione delle condizioni operative

Inoltre mi sento in dovere di ringraziare tutti i docenti che hanno creduto in me durante il mio percorso di studi trasmettendomi la loro passione e dedizione.

In questo lavoro devo soprattutto ringraziare coloro con i quali ho passato la maggior parte del tempo a mia disposizione durante questi anni, quasi fossimo fratelli, compagni, grazie al sostegno dei quali questo percorso non sarebbe mai giunto a conclusione. Sono fiero di aver potuto condividere quest'avventura con loro( in rigoroso ordine sparso Marco, Alessandro, Mirko, Matteo, Chris e Giovanni). Mi auguro che le fatiche affrontate durante questi anni possano ripagarvi al massimo perché, come sappiamo, sono state molte. Forse non rimpiangeremo gli anni passati nel Politecnico ma sicuramente ci ricorderemo di tutti i momenti belli insieme.

Ringrazio la mia famiglia che ha mi ha sostenuto nonostante gli alti e i bassi. Un grazie enorme a tutti i fantastici amici, vecchi e nuovi, e alle loro famiglie che hanno ascoltato la mia storia e han sempre creduto in me. Un grazie alle Bestie.

Infine un grazie enorme a te, Jacopo, che sei diventato la mia colonna portante in quest'ultimo anno credendo ciecamente in me e nelle mie capacità donandomi quella fiducia in me stesso, che spesso veniva a mancare.



# Indice

<b>Elenco delle figure</b>	<b>ix</b>
<b>Elenco delle tabelle</b>	<b>xi</b>
<b>1 Introduzione</b>	<b>1</b>
1.1 Descrizione generale . . . . .	1
1.1.1 Sistemi O.R.C . . . . .	1
1.1.2 Turbine Centrifughe . . . . .	4
1.2 Struttura della tesi . . . . .	5
<b>2 Metodo Chimera</b>	<b>7</b>
2.1 Descrizione generale . . . . .	7
2.2 Creazione di Griglie Composite . . . . .	9
2.2.1 Classificazione dei punti . . . . .	9
2.2.2 Descrizione del metodo . . . . .	9
2.3 Benefici del metodo . . . . .	11
2.4 Integrazione di forze e momenti . . . . .	12
<b>3 Casi di studio</b>	<b>15</b>
3.1 Descrizione della geometria . . . . .	15
3.1.1 Generazione delle griglie . . . . .	16
3.2 Analisi di densità di griglia . . . . .	18
3.3 Risultati fluidodinamici . . . . .	21
3.3.1 Variazione angolo d'attacco . . . . .	23
<b>4 Conclusioni</b>	<b>29</b>
4.1 Sviluppi futuri . . . . .	30
<b>Bibliografia</b>	<b>33</b>



# Elenco delle figure

1.1	Esempio di O.R.C. . . . . .	2
1.2	Esempio di schema d'impianto di un ciclo O.R.C. . . . . .	3
1.3	Schema di una turbina centrifuga Ljungstrom . . . . .	5
2.1	Chimera interpolation on 1D domains . . . . .	8
2.2	Overlapping component grids . . . . .	8
2.3	Dettaglio del risultato della procedura di tagging . . . . .	11
2.4	Esempio di griglie sovrapposte . . . . .	12
2.5	Griglie dopo l'eliminazione dei punti nella regione di sovrapposizione . . . . .	13
2.6	Griglia ibrida finale con celle triangolari colmanti i buchi . . . . .	13
3.1	Griglia statorica . . . . .	17
3.2	Griglia rotorica . . . . .	17
3.3	Risultato della procedura di tagging su griglie ravvicinate . . . . .	19
3.4	Risultato della procedura di tagging su griglie allargate . . . . .	20
3.5	Dettaglio delle sovrapposizioni tra griglie . . . . .	21
3.6	Posizionamento delle griglie . . . . .	22
3.7	Campo di Pressione attorno al profilo palare . . . . .	23
3.8	Dettaglio linee di corrente attorno al bordo d'attacco . . . . .	24
3.9	Andamento del residuo nel tempo . . . . .	24
3.10	Andamento della forza nel tempo . . . . .	25
3.11	Andamento della forza nel tempo . . . . .	26
3.12	Andamento del residuo nel tempo . . . . .	26
3.13	Campo di pressione attorno al profilo . . . . .	27
3.14	Andamento della forza nel tempo . . . . .	27
3.15	Andamento del residuo nel tempo . . . . .	28
3.16	Campo di velocità attorno al profilo . . . . .	28
4.1	Condizioni al contorno . . . . .	30
4.2	Sviluppo assiale degli stadi successivi . . . . .	32



# Elenco delle tabelle

1.1	Caratteristiche termodinamiche dell'MDM . . . . .	4
3.1	Caratteristiche della Turbina centrifuga . . . . .	16
3.2	Caratteristiche del primo rotore . . . . .	16
3.3	Caratteristiche del primo statore . . . . .	16
3.4	Test con griglie ravvicinate . . . . .	18
3.5	Test con griglie allargate . . . . .	19
3.6	Test con solo statore . . . . .	25



---

# Capitolo 1

## Introduzione

### 1.1 Descrizione generale

Al giorno d'oggi si fa sempre più importante la diffusione di impianti energetici con richieste di rendimenti energetici sempre più elevati premendo soprattutto su quelli ad energie rinnovabili. Per questo motivo, date le tecnologie impiegabili, si cerca di recuperare più energia possibile da un impianto. Inoltre è crescente l'esigenza di decentramento della produzione di energia e ciò promuove l'impiego di impianti di piccola potenza. Come conseguenza stanno avendo una rapida ascesa gli impianti di tipo O.R.C. (organic Rankine cycle).

#### 1.1.1 Sistemi O.R.C

Gli impianti O.R.C. per la generazione di potenza utilizzano, come fluido di lavoro, fluidi organici al posto dell'acqua. Vengono usati questo tipo di fluidi (idrocarburi, HCFC, polisilossiani) perchè presentano un elevato peso molecolare e un'elevata complessità molecolare che rendono più bassa la temperatura critica. Di conseguenza il parametro più importante per l'ottimizzazione del ciclo di base è il tipo di fluido che permette di avere ottimi risultati anche con fonti di energia a bassi temperatura.

Gli impianti O.R.C. risultano anche molto vantaggiosi in termini di costi e affidabilità dell'impianto.

Un ciclo O.R.C. è un ciclo a combustione esterna e quindi il fluido lavoro non è mai in diretto contatto con la fonte di calore. Il calore viene trasferito al fluido tramite appositi scambiatori che svolgono il compito di interfaccia tra fonte di calore e fluido di lavoro. Grazie a questa configurazione è possibile sfruttare fonti energetiche che sarebbero altrimenti difficilmente impiegabili in un ciclo a combustione interna, come carbone, idrocarburi, biomassa e fonti rinnovabili come energia solare e geotermica, oppure calore di scarto da processi industriali o da motori per ottimizzare l'efficienza energetica di questi ultimi.

Il ciclo Rankine a fluido organico, per impianti di piccola e media taglia (da poche decine di kW a qualche MW) risulta economicamente conveniente rispetto a cicli a vapore d'acqua di pari taglia, in particolare in assetto cogenerativo (nota anche con l'acronimo inglese CHP, da *combined heat and power*, produzione combinata di calore ed elettricità dove più di 4/5 dell'energia del combustibile è convertita in energia utilizzabile). Questo è causato dal fatto che in un ciclo a vapore la turbina è costituita da molti stadi (con conseguente aumento di costo) e la quantità di calore recuperabile in un impianto coge-

## 1.1. DESCRIZIONE GENERALE

---

nerativo è inferiore. In Figura 1.1 è possibile vedere un tipico ciclo Rankine nel piano temperatura-entropia.

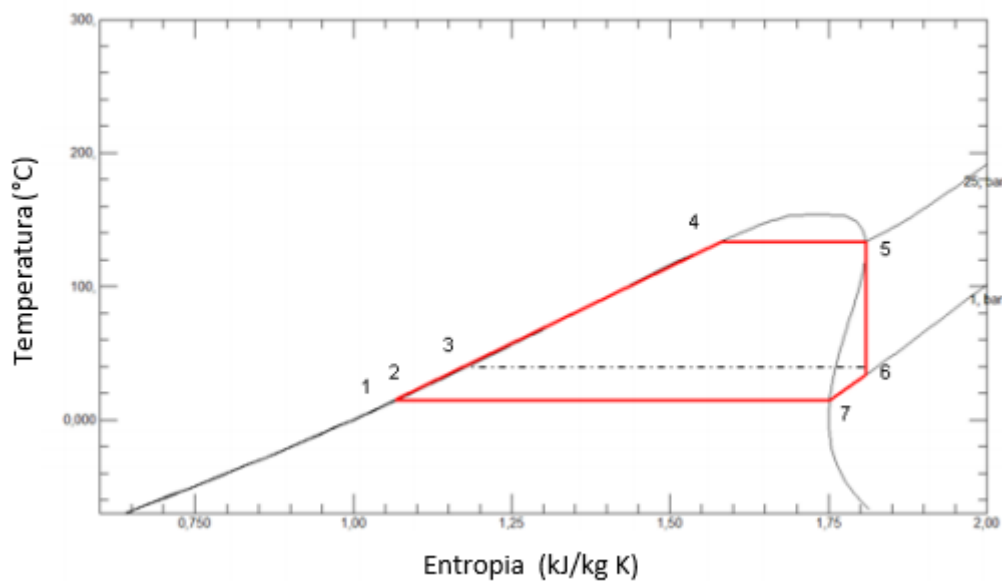


Figura 1.1: Esempio di O.R.C.

Inoltre un impianto a O.R.C. presenta un'elevata affidabilità d'impianto, veloci start-up, facilità di gestione, bassi costi di manutenzione e ottimo comportamento ai carichi parziali. La possibilità di lavorare bene anche a carichi parziali è molto importante in quanto questi impianti si trovano spesso a lavorare in queste condizioni poiché la richiesta di energia termica non è sempre costante così come anche la potenza introdotta dalla sorgente è variabile.

In Figura 1.2 è presentato un esempio di un impianto che sfrutta un ciclo di tipo O.R.C. per la generazione di energia.

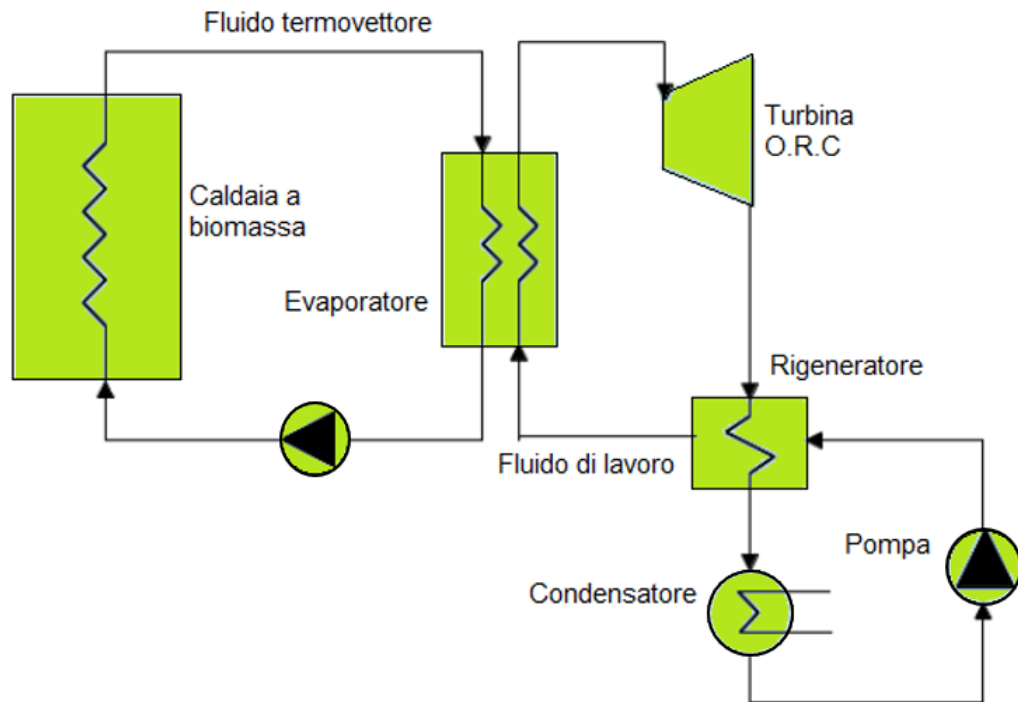


Figura 1.2: Esempio di schema d'impianto di un ciclo O.R.C.

Poiché il fluido di lavoro è il parametro più importante nell'ottimizzazione di un ciclo O.R.C., esso deve soddisfare le seguenti caratteristiche in qualità di fluido per applicazioni energetiche:

1. Debole tossicità e infiammabilità;
2. Basso o nullo O.D.P. (Ozone Deplete Potential, ovvero il potenziale di consumare lo strato di ozono atmosferico);
3. Basso o nullo G.W.P. (Global Warming Potential, ovvero il potenziale di aumentare l'effetto serra del fluido);
4. Basso costo e facile reperibilità.

Nel presente lavoro di tesi sono state effettuate delle simulazioni numeriche considerando come fluido di lavoro l'MDM (Octametiltrisilossano) ma che nelle condizioni di lavoro scelte si comporta come gas ideale.

Le caratteristiche del MDM sono elencate nella tabella 1.1

Octametiltrisilossano	
Massa molare	236.53 [kg/kmol]
Punto di ebollizione	152 [°C]
Punto triplo	-86 [°C]
Temperatura critica	290.94 [°C]
Pressione critica	15.15 [bar]
Densità critica	273.86 [kg/m <sup>3</sup> ]

Tabella 1.1: Caratteristiche termodinamiche dell'MDM

### 1.1.2 Turbine Centrifughe

La geometria delle turbine centrifughe è tale che l'area di passaggio aumenta con il raggio lungo l'espansione. Questo permette di contenere efficientemente crescenti portate volumetriche senza dover sfruttare canali fortemente divergenti i quali sono caratterizzati da basse efficienze. Due grandi vantaggi delle turbine centrifughe sono la compattezza e leggerezza che fanno sì che esse siano molto flessibili. Esse sono più semplici da progettare in quanto la velocità periferica è costante con l'altezza di pala mantenendo l'equilibrio radiale, a differenza delle turbine assiali dove il rendimento totale dello stadio è intaccato dalle condizioni non ottimali nelle quali si trovano a lavorare la base e l'apice della pala. Nelle turbine centrifughe si può ottimizzare la velocità di midspan che rimane costante lungo tutta l'altezza di pala.

A differenza delle pale svergolate delle turbine assiali, le pale delle turbine centrifughe sono a sezione costante il che ne semplifica la realizzazione tecnologica e ne riduce conseguentemente il costo di produzione.

Le turbine radiali sono più frequentemente centripete in quanto nelle turbine centrifughe il potenziale centrifugo contrasta l'estrazione di energia dal fluido diminuendone l'efficienza. Inoltre la progettazione è complicata ulteriormente dalla forza di Coriolis che devia il flusso; ma questo effetto può essere ridotto sviluppando dei profili palari ad hoc.

Il salto di entalpia nelle turbine centrifughe è piuttosto contenuto e quindi si preferisce utilizzare una soluzione con schiere rotoriche e statoriche (a differenza della soluzione con rotoroti controtanti di Ljungstorm mostrata in Figura 1.3).

L'utilizzo di fluidi di lavoro con elevata massa molecolare per sfruttare le proprietà del ciclo Rankine porta ad avere basse velocità del suono e di conseguenza ad incontrare spesso numeri di Mach elevati all'interno dei canali palari. Per ridurre questo effetto è necessario suddividere il rapporto di espansione a cavallo del singolo stadio garantendo così inoltre che le velocità periferiche siano al di sotto di quelle relative al massimo sforzo meccanico sostenibile dalle pale, aumentandone la durabilità. Il modo più semplice per diminuire il rapporto di espansione è aumentare il numero degli stadi, limitando il numero di Mach e raggiungendo efficienze più elevate.

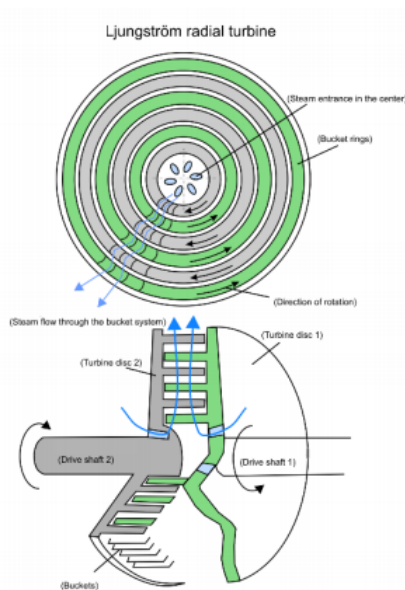


Figura 1.3: Schema di una turbina centrifuga Ljungstrom

## 1.2 Struttura della tesi

La presente relazione è composta da quattro capitoli. Dopo una breve introduzione sui sistemi operanti con ciclo Rankine a fluido organico e sull'uso delle turbine centrifughe, l'algoritmo utilizzato nel presente lavoro viene presentato nel capitolo 2.

Il capitolo 2 vuole fornire al lettore gli strumenti necessari a comprendere la logica utilizzata per generare le griglie e quali difficoltà si devono affrontare nello studio di macchine con geometrie complesse e in movimento. Vengono descritti i passaggi necessari ad ottenere la griglia finale atta ad essere utilizzata per i conti fluidodinamici.

Nel capitolo 3 si vuole effettuare uno studio preliminare per lo sviluppo di un codice di calcolo specifico alla turbomacchine. Si descrivono in dettaglio le caratteristiche geometriche e termodinamiche della macchina studiata evidenziando i motivi che hanno portato a studiarne soltanto una parte. In questo capitolo ci si concentra sullo studio del comportamento dell'algoritmo di tagging, descritto nel capitolo 2, implementato nel solutore disponibile. Si mostra la sensibilità dell'algoritmo di tagging al variare delle densità delle griglie componenti e i risultati fluidodinamici sulle griglie scelte nella precedente analisi. Infine si vuole ripetere lo stesso studio variando la densità di griglia e mostrando la convergenza del conto fluidodinamico.

La relazione termina con il capitolo 4 dove vengono presentate le conclusioni del presente lavoro e vengono suggeriti i possibili sviluppi futuri.



---

## Capitolo 2

# Metodo Chimera

All'interno del seguente capitolo si descrive l'approccio utilizzato per la generazione della griglia in questo lavoro di tesi. In questo modo il lettore può comprendere la struttura generale e quali siano le difficoltà incontrate nella creazione di una griglia di calcolo per complesse geometrie in movimento. Il metodo presentato rispetta molto l'approccio descritto da Cheshire e Henshaw [1] implementato nel software ROSITA come descritto nel manuale utente [5].

### 2.1 Descrizione generale

I metodi di tipo Chimera (noto anche come Overset grid method) sono stati originariamente sviluppati per estendere l'applicabilità di solutori di PDE (Equazioni differenziali alle derivate parziali) già esistenti a geometrie più complicate per le quali la generazione di una griglia non strutturata, con un desiderato livello di accuratezza, poteva risultare arduo.

Questi metodi permettono il partizionamento del dominio in sottodomini più semplici in sovrapposizione, i quali possono essere discretizzati individualmente utilizzando una griglia strutturata. La griglia risultante dall'applicazione del metodo è detta griglia *composita* ed è generata utilizzando un insieme di griglie sovrapposte, dette griglie *componenti*. La griglia composita copre l'intera regione all'interno della quale si vuole risolvere le PDE.

Le griglie componenti, solitamente impiegate per la generazione di griglie Chimera, sono diverse griglie individuali attorno a corpi che delineano la geometria e alcune griglie di fondo (spesso Cartesiane). Ciascuna griglia componente può essere creata in maniera quasi completamente indipendente. Le griglie componenti attorno ai corpi risolvono il dettaglio del dominio vicino ai contorni della geometria e pertanto possono essere infittite al richiedersi di una migliore risoluzione. Le griglie di fondo, invece, risolvono la rimanente parte del dominio senza avere la necessità di essere infittite. La generazione di queste griglie non è completamente indipendente in quanto esse devono coprire l'intera regione. Inoltre, nella zona di sovrapposizione, è consigliato avere la stessa densità in ogni griglia per motivi di convergenza del metodo. Di conseguenza si otterrà una soluzione numerica mellifluamente rappresentata su ciascuna griglia componente; se ciò non fosse, i punti della griglia più densa sarebbero inutilizzati e sprecati.

La comunicazione tra le griglie avviene attraverso delle aree sovrapposte. In suddette aree, diverse file di celle confinanti con il bordo del dominio vengono interpolate da celle calcolate in un altro dominio. Le interpolazioni sono svolte sulle variabili di stato al

## 2.1. DESCRIZIONE GENERALE

---

centro delle celle come mostrato in Figura 2.1. Tuttavia queste interpolazioni non garantiscono la conservazione dei flussi attraverso i domini e possono introdurre errori numerici mettendo a rischio la convergenza del calcolo fluidodinamico. Per questo motivo griglie sufficientemente fini e di simili dimensioni sono necessarie nelle zone di sovrapposizione.

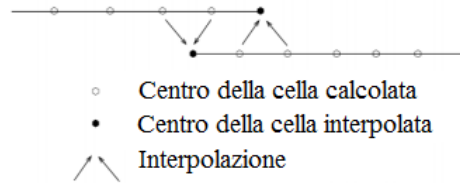


Figura 2.1: Chimera interpolation on 1D domains

A titolo di esempio di quanto appena spiegato, in figura Figura 2.2 è presentata la struttura del presente lavoro. La griglia composta sarà generata da 81 griglie componenti: 1 griglia di fondo, 1 griglia di campo, 52 griglie rotoriche e 27 griglie statoriche. Le griglie sono elencate in ordine di priorità crescente: la griglia di fondo giace al di sotto di tutte le altre, sovrapposta ad essa la griglia di campo e le 27 griglie statoriche ed infine le 52 griglie rotoriche che sovrastano l'intero stadio.

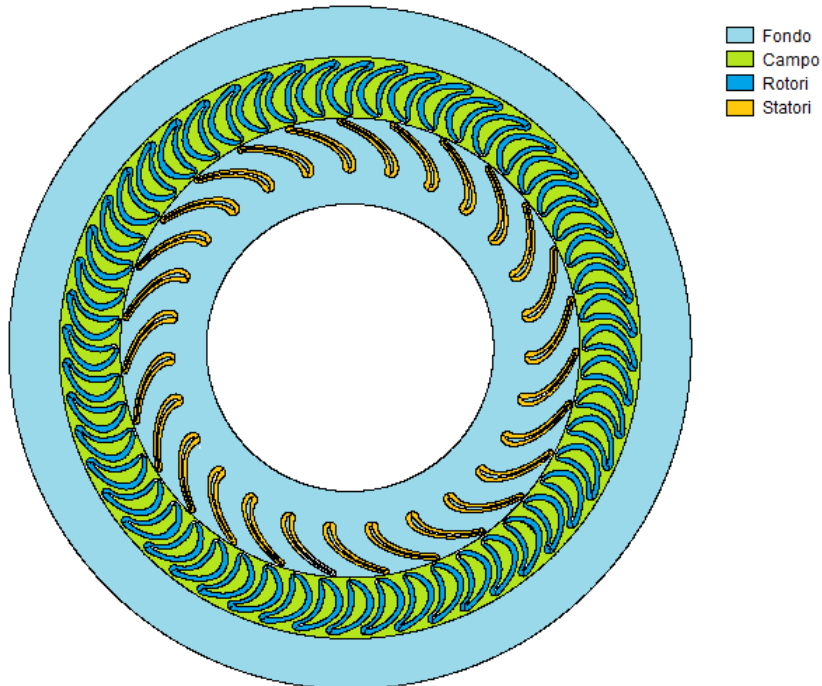


Figura 2.2: Overlapping component grids

## 2.2 Creazione di Griglie Composite

In quel che segue le griglie componenti possono essere sia mono-blocco sia multi-blocco e la procedura è applicabile sia a griglie bidimensionali sia tridimensionali. Il termine "punto" fa riferimento al centro di una cella della griglia.

### 2.2.1 Classificazione dei punti

Prima di tutto è necessario creare correttamente tutte le griglie componenti tenendo conto dei requisiti di spaziatura delle griglie nelle aree di sovrapposizione. Il passo successivo è la generazione della griglia composta tramite la procedura nota anche come *Tagging*. Il metodo deve riconoscere tutti gli elementi presenti nelle zone di sovrapposizione tra griglie in maniera da individuare tutti i punti utilizzabili per l'interpolazione tra griglie. La procedura deve anche ricercare le zone, e di conseguenza i punti, non necessari ai fini del calcolo.

Alla conclusione dell'algoritmo di tagging, ogni punto di una griglia composta deve appartenere ad una delle categorie:

- **Punti validi:** tutti i punti usati per discretizzare le PDE classificabili in *punti interni* oppure *punti di contorno*.
- **Punti di bordo:** tutti i punti giacenti in regioni di sovrapposizione che possono essere interpolati attraverso la discretizzazione di punti di un'altra griglia componente (*punti donatori*). Per motivi di efficienza, l'obiettivo è di avere griglie composite con il minimo numero di punti di bordo.
- **Punti cavi:** tutti i punti non utilizzati durante il calcolo perchè appartenenti a regioni occupate da corpi solidi.

La soluzione viene comunicata attraverso i punti di bordo e i punti donatori. Se un punto di bordo non è allo stesso tempo donatore, l'interpolazione è detta esplicita perchè è fatta soltanto attraverso i punti validi dove la soluzione è nota. nel caso in cui un punto sia contemporaneamente donatore e di bordo, l'interpolazione è detta implicita e per ottenere la soluzione nel punto è necessario risolvere un sistema.

L'interpolazione esplicita, che necessita di una sovrapposizione più ampia, è la strategia adottata all'interno di ROSITA.

### 2.2.2 Descrizione del metodo

Per il corretto funzionamento del metodo è necessario specificare la priorità tra le griglie. In ROSITA essa è comunicata attraverso l'ordine nella definizione delle griglie. Di conseguenza l'indice di priorità  $k=1,2,\dots,n_g$  sarà definito con numeri interi, dove l'indice 1 sarà assegnato alla griglia con priorità più bassa e l'indice  $n_g$  alla griglia di priorità più alta (dove  $n_g$  è il numero di griglie componenti). Tramite questa definizione la griglia con indice più elevato sarà quella che giacerà sopra le griglie con indice inferiore.

L'algoritmo cercherà di conservare più punti possibile dalla griglia di priorità più alta eliminando i punti che stanno al di sotto di essa su griglie con priorità più bassa.

Nell'esempio di Figura 2.2 la griglia di fondo ha la priorità più bassa ( $k=1$ ), la griglia di campo ha priorità intermedia ( $k=2$ ), mentre le griglie rotoriche e statoriche hanno la priorità più alta ( $k=3,\dots,81$ ).

Definita la priorità tra le griglie, l'algoritmo procede come segue:

1. All'inizio vengono identificati i contorni del dominio aventi una condizione al contorno di parete solida e di conseguenza tutti i punti presenti nelle regioni di sovrapposizione vicino a questi contorni vengono classificati come punti cavi.
2. L'algoritmo iterativo identifica i punti donatori e di bordo facendo crescere i punti cavi finché non riempiono completamente le regioni al di fuori del dominio di calcolo.
3. L'algoritmo procede automaticamente individuando i sopraelencati punti validi, cavi e di bordo.

Al termine della procedura la classificazione dei punti restituisce una stringa di identificazione ICHIM. Il valore assunto dalla stringa per ogni punto di ogni griglia componente è definito rispettando la seguente definizione:

$$f(x) = \begin{cases} l & \text{se il punto P è un **punto valido**;} \\ l' \neq l & \text{se il punto P è un **putno di bordo** interpolato dalla griglia } l'; \\ -l' & \text{se il punto P è un **punto cavo** per via della griglia } l'. \end{cases} \quad (2.1)$$

Il solutore ROSITA permette all'utente di impostare diversi parametri per dell'algoritmo Chimera in un dedicato file di ingresso. L'utente può impostare 3 parametri di controllo in aggiunta alla possibilità di gestione delle tolleranze geometriche, come spiegato nel manuale utente [5].

I parametri di controllo sono:

- Dimensione dello stencil: definisce la grandezza del supporto di interpolazione che può essere largo una o due celle. Un supporto più ampio permette una migliore accuratezza ma l'algoritmo di tagging impiega più tempo a convergere e di conseguenza potrebbe fallire nel caso in cui la sovrapposizione delle griglie non sia sufficiente.
- Massimo numero di iterazioni: l'algoritmo implementato dovrebbe convergere in 2 iterazioni a meno che vi siano regioni con più di una sovrapposizione.
- Controllo di consistenza del tagging instazionario: se impostato su "vero", l'algoritmo effettua una verifica di consistenza tra due istanti di tempo successivi.

Le tolleranze geometriche sono:

- La tolleranza assoluta e la relativa finalizzate a determinare la caduta di un punto all'interno o meno di una cella.
- La tolleranza assoluta per determinare se un punto si trovi all'interno di una cella vicina a superfici sovrapposte.
- La tolleranza assoluta per verificare che due punti coincidano.

Per una miglior comprensione del funzionamento dell'algoritmo, si fa riferimento all'esempio introdotto in precedenza in questo capitolo. In Figura 2.3 si può vedere il risultato della procedura di tagging, implementata in ROSITA, applicata sulle griglie elencate. E' possibile individuare le zone della griglia occupate dai punti *validi* (in rosso), punti *cavi* (in blu) e punti *di bordo* (in verde).

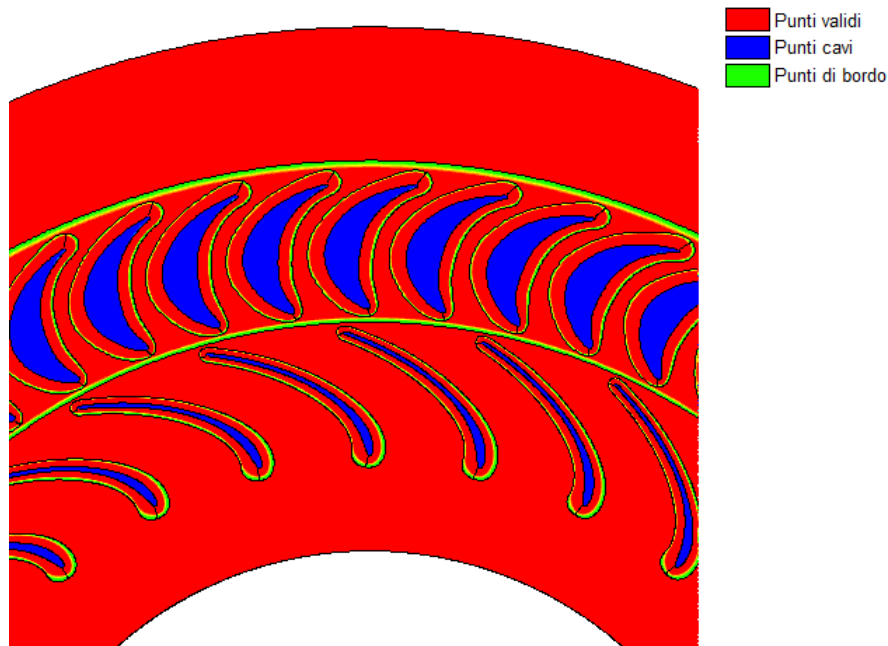


Figura 2.3: Dettaglio del risultato della procedura di tagging

## 2.3 Benefici del metodo

La tecnica Chimera presentata da Cheshire and Henshaw [1] offre elevata flessibilità per la generazione di griglie attorno a geometrie complesse e/o in movimento. Per questo motivo è la tecnica implementata nel software ROSITA il quale è stato creato pensando agli organi in movimento presenti in un elicottero.

L'elevata flessibilità dell'approccio è dovuta al fatto che la griglia attorno ad ogni componente della geometria può essere generata in modo indipendente. La comunicazione tra le griglie avviene nelle aree sovrapposte all'interno delle quali le celle vicino al bordo del dominio vengono interpolate usando i valori contenuti in altre celle del dominio sulle variabili di stato al centro delle celle.

Il metodo non richiede una specifica superficie di taglio fornita dall'utente al contrario dei metodi proposti da Steger et al. oppure di Meaki. La tecnica può gestire contorni solidi definiti da più di una griglia sovrapposta e non è necessario che i suddetti contorni formino una superficie chiusa. Il numero di operazioni necessarie per costruire una griglia composita è dell'ordine di  $(n_g)^2 N$  dove  $n_g$  è il numero di griglie componenti e  $N$  è il numero totale dei punti della griglia.

Una griglia composita ha un vantaggio rispetto ad una griglia non strutturata dato che un insieme di griglie logicamente rettangolari è più efficiente in termini di immagazzinamento e tempi di CPU.

## 2.4 Integrazione di forze e momenti

Poiché i metodi Chimera sono procedure atte a risolvere Equazioni alle derivate perziali su domini 2D e 3D, le quantità più importanti richieste da una simulazione numerica su corpi solidi lambiti da un flusso sono i coefficienti di forze e momenti. Per ottenere queste quantità è necessaria l'integrazione della pressione e degli sforzi viscosi sulle griglie di superficie e nel caso di griglie non strutturate si tratta di una procedura lineare. Nel caso delle griglie composite dove le griglie componenti possono sovrapporsi, al fine di ottenere un'accurata valutazione dei coefficienti di forze e momenti lo schema di integrazione dovrebbe tener conto soltanto una volta dei carichi presenti nelle regioni di sovrapposizione.

L'approccio implementato in ROSITA ed usato nel presente lavoro si basa sulla procedura proposta da Chan e Buning [2]. Il metodo usato consiste nel rimuovere i punti di bordo presenti nelle regioni di sovrapposizione e nel sostituire le lacune con elementi triangolari conformi con la superficie originale. Griglie di questo tipo sono chiamate **griglie cerniera** e la risultante griglia ibrida è composta da celle quadrilaterali provenienti dalla griglia composita di origine e da celle triangolari che hanno riempito le regioni di sovrapposizione.

Poiché gli elementi introdotti sono triangolari non vengono aggiunti nuovi punti durante la generazione della griglia ibrida e di conseguenza gli sforzi sono noti in ogni punto e possono essere integrati in maniera efficiente con l'accuratezza desiderata.

La procedura per generare la griglia ibrida è la seguente:

1. Per ogni coppia di griglie sovrapposte l'algoritmo individua la più lasca. I punti della griglia più rada appartenenti alla regione di sovrapposizione vengono eliminati producendo un buco tra le griglie sovrapposte Figura 2.4.
2. I punti presenti sul contorno dei buchi prodotti vengono raccolti in stringhe ordinate Figura 2.5.
3. La regione di buco tra ogni coppia di stringhe compatibili è riempita con un singolo livello di triangoli connettendo correttamente i punto nelle due stringhe Figura 2.6.

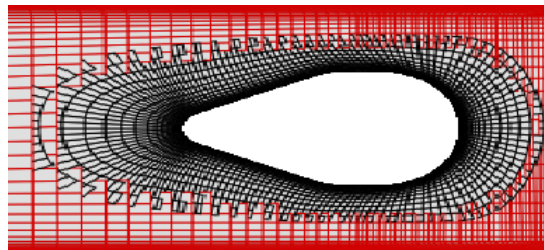


Figura 2.4: Esempio di griglie sovrapposte

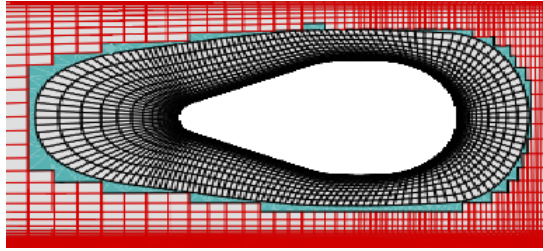


Figura 2.5: Griglie dopo l'eliminazione dei punti nella regione di sovrapposizione

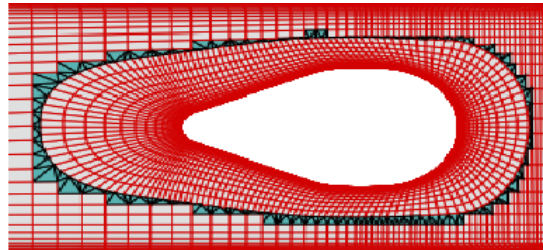


Figura 2.6: Griglia ibrida finale con celle triangolari colmanti i buchi



## Capitolo 3

# Casi di studio

Nel presente capitolo viene analizzata la gestione della griglia sotto descritta da parte del solutore fluidodinamico ROSITA al fine di compiere una valutazione preliminare del codice di calcolo. La griglia è stata sviluppata in maniera da poter sfruttare l'algoritmo Chimera. A tale scopo, oltre alle griglie attorno ai profili di statore e rotore, sono state create una griglia di fondo ed una di campo. Sfruttando la griglia composita generata verrà analizzato il comportamento dell'algoritmo di tagging, descritto nel capitolo precedente, al variare della densità della griglia di calcolo e il conseguente impatto sui risultati fluidodinamici. Infine si vuole vedere come varia il comportamento dell'algoritmo al variare radicale della geometria della macchina cambiando gli angoli di attacco delle palette della turbina.

Bisogna precisare che l'analisi sarà limitata allo studio preliminare di un settore dell'intero stadio. Questo è dovuto al fatto che il software ROSITA è in grado di gestire condizioni al contorno di velocità soltanto imponendo le componenti del vettore velocità al contorno. Per poter studiare l'intero stadio è necessaria una modifica del codice sorgente del solutore affinché il vettore velocità venga proiettato lungo il versore normale di ciascuna cella appartenente al contorno dove si vuole imporre la condizione.

### 3.1 Descrizione della geometria

La geometria del primo stadio della turbina centrifuga, già accennata nel Capitolo 2 del presente lavoro, è stata proposta ed ottimizzata dal Dipartimento di Energia del Politecnico di Milano nella Tesi di V.Pendenza [4].

Le turbine centrifughe per O.R.C. lavorano spesso in condizioni di offdesign, di conseguenza, per mantenere efficienze accettabili, sono più adatte le macchine con più stadi perché il rapporto di espansione totale è ripartito sugli stadi. In questo modo si evita di far insorgere flussi supersonici e blocchi sonici. All'aumentare del numero degli stadi, aumentano anche le dimensioni e di conseguenza il costo effettivo della macchina. Come compromesso si preferisce progettare una macchina che raggiunga condizioni transoniche, costituita da ugelli solo convergenti, con deboli fenomeni di postespansione a valle della schiera, garantendo flessibilità ed efficienza con un numero di stadi limitato.

La turbina centrifuga conseguentemente scelta è composta da 6 stadi ed opera in condizioni transoniche in cui il numero di Mach massimo atteso non supera l'unità. E' fissata la portata massica  $22 [kg/s]$  mentre il diametro di ingresso è di  $200 [mm]$ .

In seguito si presentano le caratteristiche termodinamiche e geometriche della macchina nella sua totalità (tabella 3.1) e del primo stadio completo (tabelle 3.2 e 3.3).

### 3.1. DESCRIZIONE DELLA GEOMETRIA

---

Macchina globale	
$D_{in}$	0.2 [m]
$D_{out}$	0.98 [m]
$p_{t,in}$	10 [bar]
$p_{out}$	0.170 [bar]
$T_{in}$	273.475 [°C]
$T_{out}$	229.641 [°C]

Tabella 3.1: Caratteristiche della Turbina centrifuga

Primo statore	
$D_{in}$	0.2 [m]
$D_{out}$	0.252 [m]
$p_{t,in}$	10 [bar]
$p_{out}$	6.525 [bar]
$T_{in}$	273.475 [°C]
$T_{out}$	265.283 [°C]
b (corda radiale)	26 [mm]
$n^{\circ}$ dipale	27

Tabella 3.2: Caratteristiche del primo rotore

Primo rotore	
$D_{in}$	0.262 [m]
$D_{out}$	0.314 [m]
$p_{t,in}$	9.343 [bar]
$p_{out}$	5.071 [bar]
$T_{in}$	265.847 [°C]
$T_{out}$	261.929 [°C]
b (corda radiale)	26 [mm]
$n^{\circ}$ dipale	52

Tabella 3.3: Caratteristiche del primo statore

#### 3.1.1 Generazione delle griglie

Lo strumento utilizzato per la generazione delle griglie è ANSYS ICEM CFD<sup>®</sup> che permette di produrre le griglie in un formato accettabile dal solutore ROSITA. Le griglie utilizzate sono rettangolari e bidimensionali. ROSITA non è in grado di fare simulazioni bidimensionali e di conseguenza crea una griglia quasi-tridimensionale, replicando la griglia bidimensionale nella terza dimensione al fine di creare tre strati di celle. In questo modo il solutore non si accorge che si stanno effettuando analisi su un piano bidimensionale risolvendo un flusso come se fosse tridimensionale, ma la natura delle griglie è tale da non creare componenti nella direzione perpendicolare al piano palare.

La griglia di fondo è stata estesa ben oltre i limiti geometrici in ingresso e uscita in quanto è necessario per evitare riflessioni spurie. Questo non compromette il flusso

in ingresso in quanto è definito uniforme ma potrebbe invece creare problemi qualora si volesse studiare l'interazione con stadi successivi. In Figura 3.1 e in Figura 3.2 si possono vedere due esempi di griglie generate tramite ANSYS ICEM CFD<sup>®</sup>.

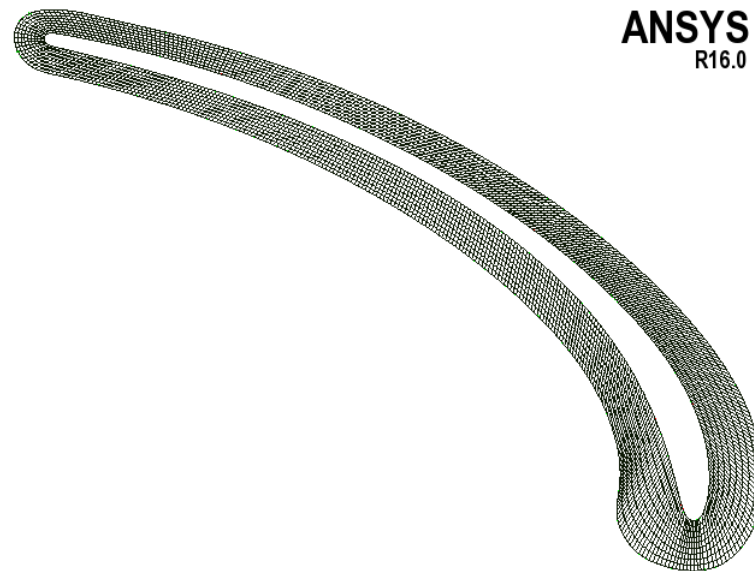


Figura 3.1: Griglia statorica

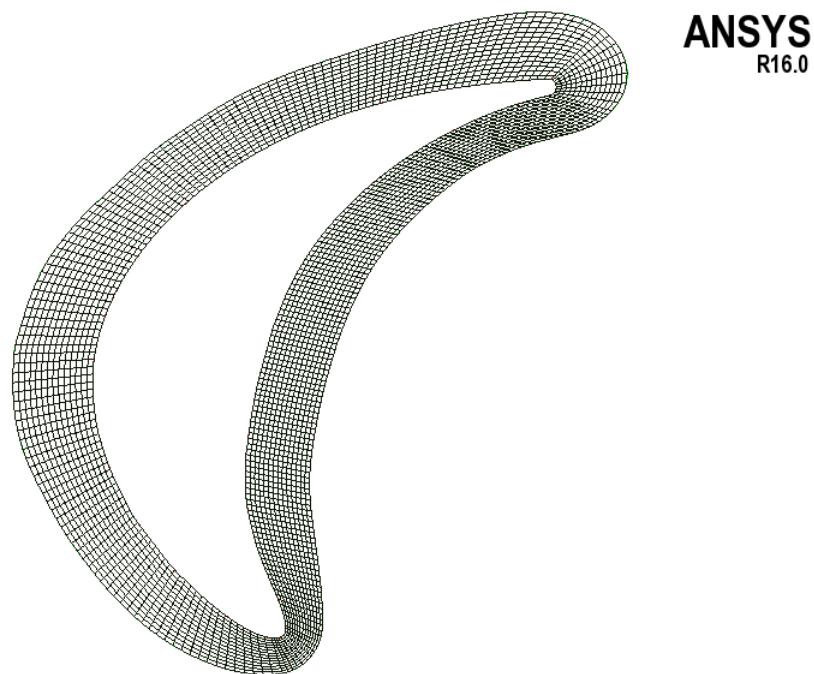


Figura 3.2: Griglia rotorica

### 3.2 Analisi di densità di griglia

Di seguito si presentano i risultati ottenuti durante lo studio dell'algoritmo Chimera al variare della densità di griglia. La dimensione delle celle viene mantenuta il più possibile simile in quanto requisito del metodo Chimera, senza il quale l'algoritmo potrebbe non raggiungere la convergenza.

La prima configurazione analizzata è quella in cui le griglie attorno alle palette sono molto vicine ai bordi solidi di quest'ultime. Un design di questo tipo, con griglie addensate attorno al profilo, permette di avere alta risoluzione delle variabili fluidodinamiche nelle zone di maggiore interesse ed inoltre di risolvere meglio lo strato limite. Una griglia sottile però mette a rischio sia la convergenza dell'algoritmo di tagging perchè si hanno transizioni tra le zone molto vicine tra loro, sia la convergenza del calcolo fluidodinamico.

Prima di presentare i risultati va ricordato che la convergenza dell'algoritmo Chimera con una sovrapposizione, generalmente, converge in due o tre iterazioni. Il tempo di convergenza e il numero di iterazioni aumentano all'aumentare del numero di celle e del numero di sovrapposizioni. Nella tabella 3.4 è possibile vedere i risultati relativi a sei test eseguiti con diversi addensamenti di griglia. I primi tre test sono andati a convergenza con successo in quanto la griglia è sufficientemente densa da far sì che l'algoritmo Chimera abbia un numero di celle sufficiente sulle quali effettuare l'interpolazione nelle zone di sovrapposizione. Più alta è la densità di celle, più sottile sarà la zona di punti di bordo dove è necessaria l'interpolazione e maggiori saranno i punti validi. Al diminuire della densità le celle nelle zone di sovrapposizione non sono più sufficienti per effettuare correttamente l'interpolazione. L'algoritmo cerca tutte le possibili combinazioni di celle per effettuare l'interpolazione e di conseguenza il numero di iterazioni aumenta. I tempi di CPU diminuiscono sempre perchè sono legati principalmente al numero di celle gestite dal processore come si vede anche dal paragone con i test della tabella 3.5; test con simile numero di celle impiegano lo stesso tempo di calcolo.

N°	Celle valide	Celle di bordo	Celle cave	Celle totali	Iterazione	CPU	Stato
Test 1	12349320	789528	7138800	20777648	23	11038.0	Ok
Test 2	9115404	680568	4236564	14032536	18	4173.8	Ok
Test 3	2315061	342420	782091	3439527	10	311.6	Ok
Test 4	0	0	1207944	1207944	19	126.4	NOk
Test 5	0	0	495624	495624	12	27.3	NOk
Test 6	46881	6891	115776	169548	40	5.1	NOk

Tabella 3.4: Test con griglie ravvicinate

Il risultato prodotto dall'algoritmo di tagging per questa configurazione è raffigurato in Figura 3.3 dove si possono distinguere i tre tipi di celle classificati come descritto nel capitolo 2. Inoltre, tramite i bordi delle singole griglie, si evince che si hanno al massimo tre griglie sovrapposte gestite dal metodo Chimera a seconda dei livelli di priorità impostati in precedenza.

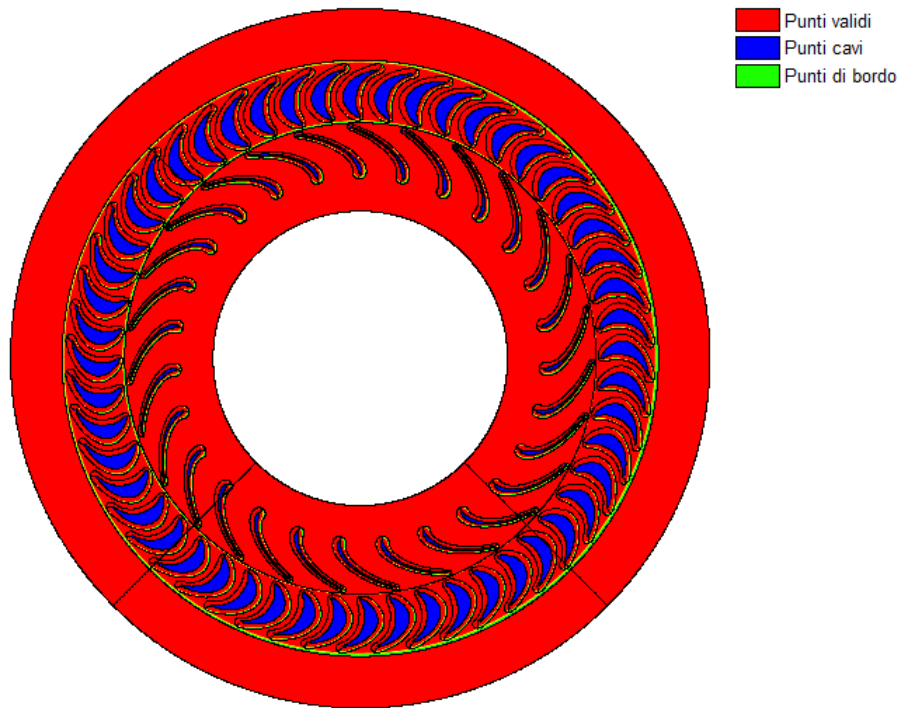


Figura 3.3: Risultato della procedura di tagging su griglie ravvicinate

La seconda configurazione analizzata è quella in cui le griglie attorno alle palette sono più lontane dai bordi solidi di quest'utime. In una configurazione di questo tipo si privilegia di più la zona a valle e a monte del profilo, invece dello strato limite. Una griglia di questo genere richiede un numero di celle maggiore ma, avendo un passaggio più graduale tra le zone, non compromette la convergenza dell'algoritmo di tagging facilitando anche la convergenza del conto fluidodinamico. Nella specifica configurazione però, aumentando le dimensioni delle griglie palari, si va incontro alla sovrapposizione delle griglie rotoriche e statoriche che producono in questo modo un'ulteriore sovrapposizione tra le griglie da gestire dall'algoritmo Chimera arrivando a zone con quattro griglie sovrapposte come si può vedere in Figura 3.5.

Considerando che il tagging incide sul tempo di calcolo, soprattutto nel caso di un conto dinamico, è necessario che l'utente abbia bene in mente quale livello di qualità sia richiesto dal conto fluidodinamico e quali siano le risorse a sua disposizione.

N°	Celle valide	Celle di bordo	Celle cave	Celle totali	Iterazione	CPU	Stato
Test 1	25296771	1044546	21129471	47470788	27	13678.3	Ok
Test 2	16897836	808530	13270878	30977244	22	5311.9	Ok
Test 3	6401418	429690	3435312	10266420	10	447.5	Ok
Test 4	1510290	231603	97445	2716334	6	89.74	Ok
Test 5	0	0	795618	795618	21	49.3	NOk
Test 6	0	0	455952	455952	14	25.1	NOk

Tabella 3.5: Test con griglie allargate

### 3.2. ANALISI DI DENSITÀ DI GRIGLIA

---

Il risultato prodotto dall’algoritmo di tagging per questa configurazione è raffigurato in Figura 3.4 dove si possono distinguere i tre tipi di celle classificati come descritto nel capitolo 2. Inoltre tramite i bordi delle singole griglie si può vedere che si hanno addirittura zone con quattro griglie sovrapposte che il metodo Chimera gestisce a seconda dei livelli di priorità impostati in precedenza (in dettaglio in figurename 3.5).

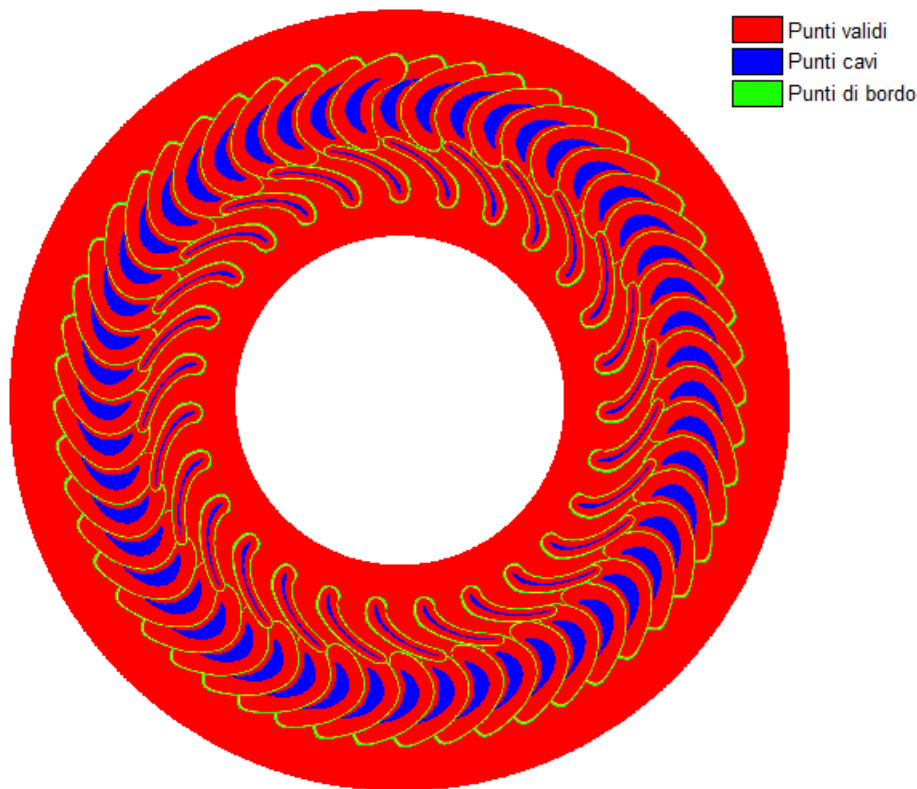


Figura 3.4: Risultato della procedura di tagging su griglie allargate

Nella configurazione presentata si nota inoltre che, dato l’elevato numero di rotori, le griglie allargate vanno a sovrapporsi tra di loro cosa che non implica un problema ad una griglia sufficientemente densa. Inoltre, le griglie rotoriche, non hanno tutte lo stesso livello di priorità ma è assegnato progressivamente partendo dal primo rotore posto alla sommità della schiera, posizionando le griglie palari successive in senso antiorario. In questo modo le sovrapposizioni tra lo stesso tipo di griglia replicata è gestito come le altre sovrapposizioni.

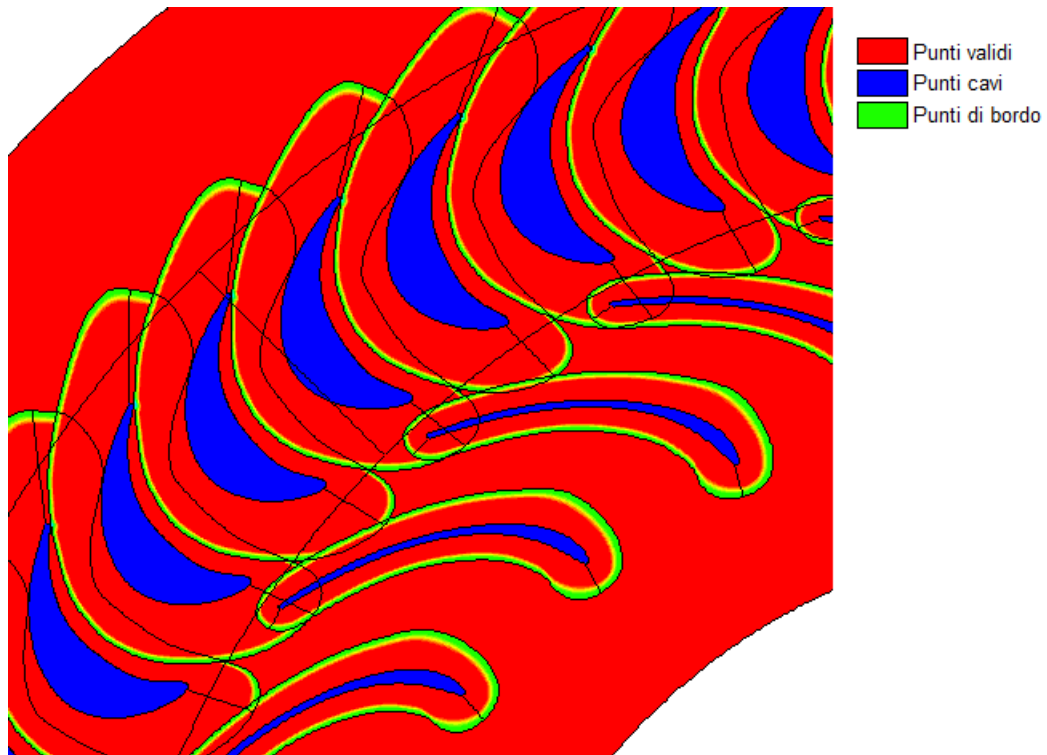


Figura 3.5: Dettaglio delle sovrapposizioni tra griglie

### 3.3 Risultati fluidodinamici

Nella presente sezione si vuole ottenere i risultati fluidodinamici in termini di pressione, campo di velocità e forze integrali attorno al profilo palare sfruttando la mesh Chimera generata in precedenza e risolvendo le equazioni di Eulero.

Come accennato nei capitoli precedenti, il solutore fluidodinamico ROSITA non è in grado di imporre la velocità del flusso uniforme lungo contorni curvilinei ma permette soltanto di imporre il vettore velocità del flusso a monte della griglia. Di conseguenza è possibile studiare il comportamento soltanto di un settore dello stadio della turbina. In Figura 3.6 si può vedere come sono posizionate le relative griglie all'interno del settore angolare che si è scelto di studiare. Le griglie sono state sviluppate tenendo a mente di voler risolvere le Equazioni di Eulero per lo studio preliminare del codice di calcolo specifico per turbomacchine.

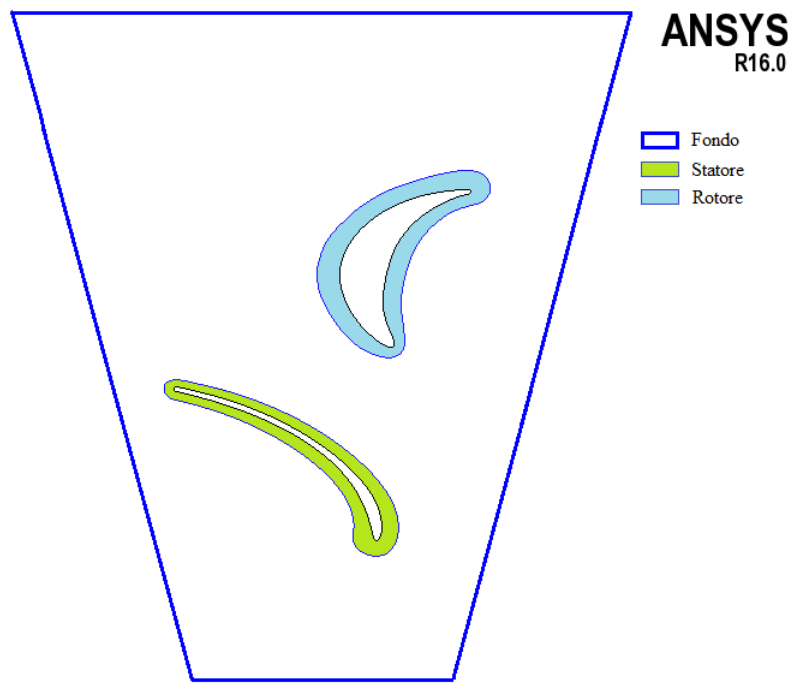


Figura 3.6: Posizionamento delle griglie

La convergenza dell'algoritmo di tagging non garantisce la convergenza del solutore fluidodinamico. Le difficoltà incontrate nel tentativo di ottenere dei risultati fluidodinamici sono diverse:

- La realizzazione delle griglie Chimera in una geometria di turbomacchina costringe ad avere griglie molto vicine alla superficie delle palette per evitare troppe sovrapposizioni in quanto la schiera è costituita di numerose palette molto ravvicinate. Di conseguenza il bordo di interpolazione generato dall'algoritmo Chimera è molto vicino alle superfici dove vengono imposte le condizioni al contorno. Questo peggiora notevolmente il conto fluidodinamico costringendo ad allontanare progressivamente il bordo delle griglie e ad un infittimento che grava sui tempi di calcolo. Facendo in questo modo si è costretti ad allargare la griglia di fondo e le griglie palari le quali vanno a sovrapporsi ulteriormente. Questo non è un problema nello studio di un settore di pala ma, se si volesse studiare l'intera schiera dove le palette sono molto ravvicinate, potrebbe risultare un impedimento. Inoltre la sovrapposizione tra la griglia rotorica e quella statorica fa sì che i contorni chimera risultino nuovamente troppo vicini ai alle superfici delle pale costringendo a studiarli individualmente. Tramite un metodo iterativo è necessario ricercare una configurazione delle griglie di pala (in termini di forma e densità di griglia) che permetta di avere griglie sufficientemente vicine al contorno da far convergere il conto fluidodinamico.
- La geometria delle pale di turbomacchine è molto complessa. In particolare nel caso studiato la pala statorica risulta molto inclinata e l'avvio di un conto, seppur stazionario, risulta complicato perché il profilo risulta stallato fin dall'inizio. Questo impedisce al solutore di trovare una soluzione fisica al bordo di uscita della pala statorica trovando valori negativi che fanno terminare il conto anticipatamente.

Per ottenere una soluzione fisica è possibile variare l'angolo di attacco della pala statorica variando la direzione del flusso. In questo modo, tramite un conto instazionario, sarebbe possibile ottenere una condizione di partenza più fisica adatta al conto stazionario.

### 3.3.1 Variazione angolo d'attacco

Variando l'angolo d'attacco del profilo dello statore rispetto alla direzione del flusso, la convergenza del conto fluidodinamico mediante la soluzione delle equazioni di Eulero migliora producendo un risultato numericamente accettabile. In Figura 3.6 si può apprezzare il campo di Pressione attorno al profilo palare e in Figura 3.8 si possono notare le linee di corrente attorno al profilo palare. In Figura 3.9 si può vedere l'andamento del residuo che si stabilizza attorno ad una soluzione stazionaria, mentre in Figura 3.10 è visibile l'andamento della forza laterale nello pseudo-tempo che rimane stabilizzata attorno ad un valore. La convergenza si dice raggiunta quando il residuo non diminuisce più ma rimane stabile tra le successive iterazioni.



Figura 3.7: Campo di Pressione attorno al profilo palare

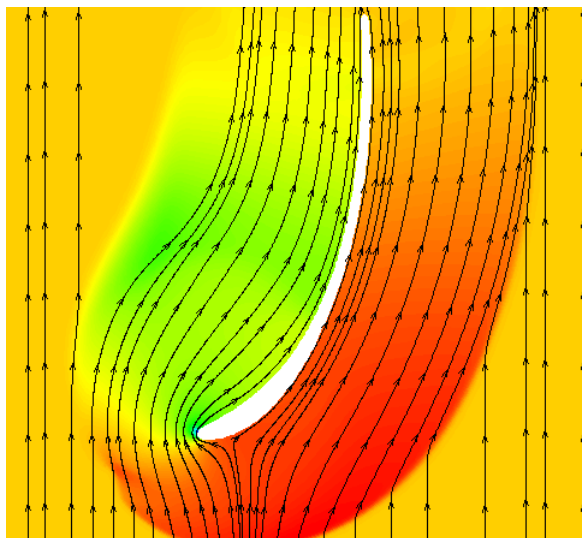


Figura 3.8: Dettaglio linee di corrente attorno al bordo d'attacco

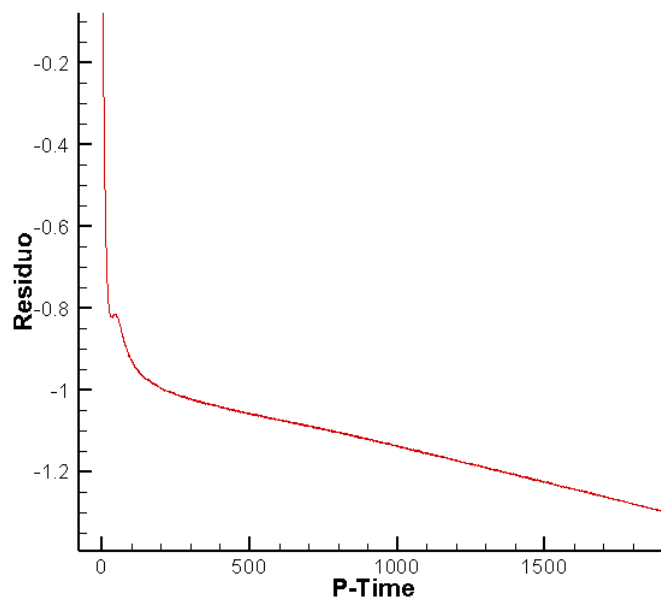


Figura 3.9: Andamento del residuo nel tempo

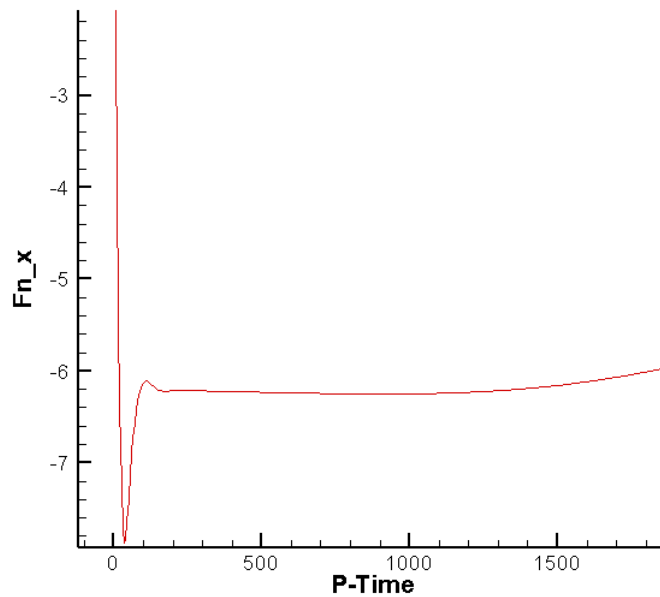


Figura 3.10: Andamento della forza nel tempo

Partendo dalla soluzione mostrata sopra sono stati effettuati due test con due livelli di infittimento della griglia ma al medesimo CFL perché potessero essere confrontabili come si può vedere nella tabella 3.6.

N°	Celle valide	Celle di bordo	Celle cave	Celle totali	CPU	Residuo	CFL
Test 1	572802	4185	31908	608895	4216.3	-0.932	2
Test 2	11819658	17910	1192347	13029915	14614.8	-1.816	2

Tabella 3.6: Test con solo statore

Il primo test è stato effettuato con una griglia lasca ed ha raggiunto velocemente la convergenza come si evince dalla Figura 3.12 dove viene mostrato l'andamento del residuo nello pseudo-tempo. In Figura 3.11 viene invece mostrato come evolve nello pseudo-tempo la forza laterale. Essa non è stabile in quanto dal bordo d'attacco iniziano a staccarsi vortici che proseguono a ridosso del ventre del profilo come si può notare dal campo di pressione in Figura 3.13.

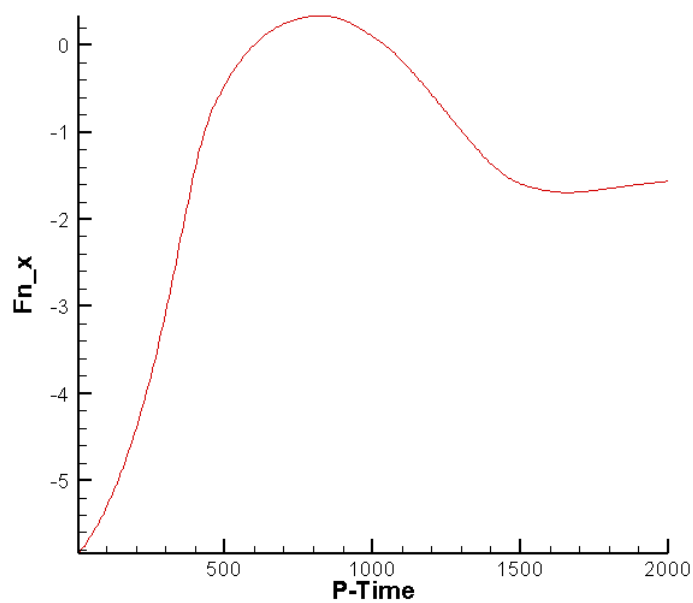


Figura 3.11: Andamento della forza nel tempo

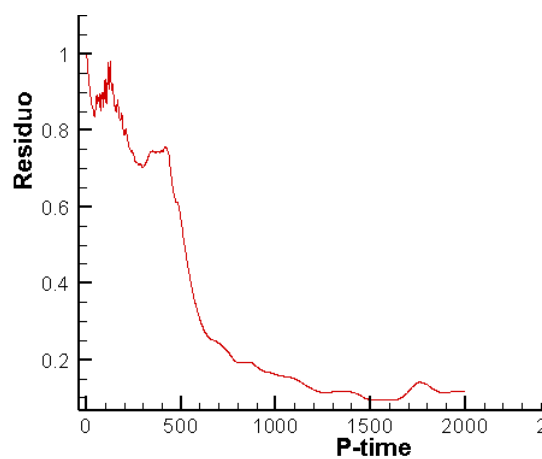


Figura 3.12: Andamento del residuo nel tempo

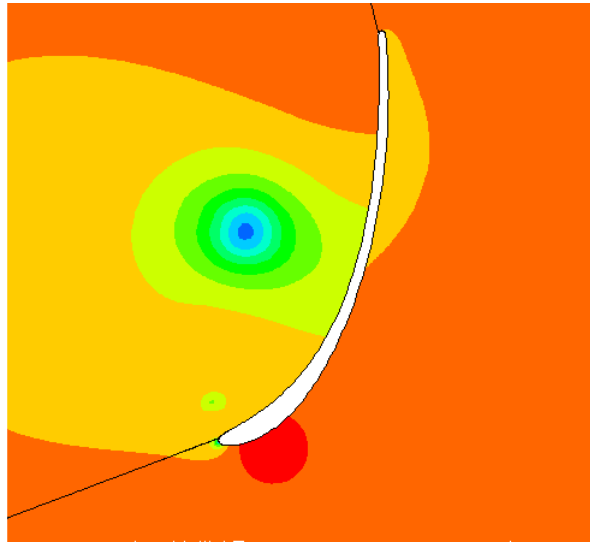


Figura 3.13: Campo di pressione attorno al profilo

Al contrario nel secondo test, effettuato con una griglia molto più fitta, si ha un andamento del residuo più stabile a convergenza, nonostante abbia incontrato più difficoltà del test precedente come mostrato in Figura 3.15. In Figura 3.14 si può vedere l'andamento della forza laterale nello pseudo-tempo anch'essa non più stabile attorno ad un unico valore per via dei vortici controrotanti mostrati in Figura 3.16.

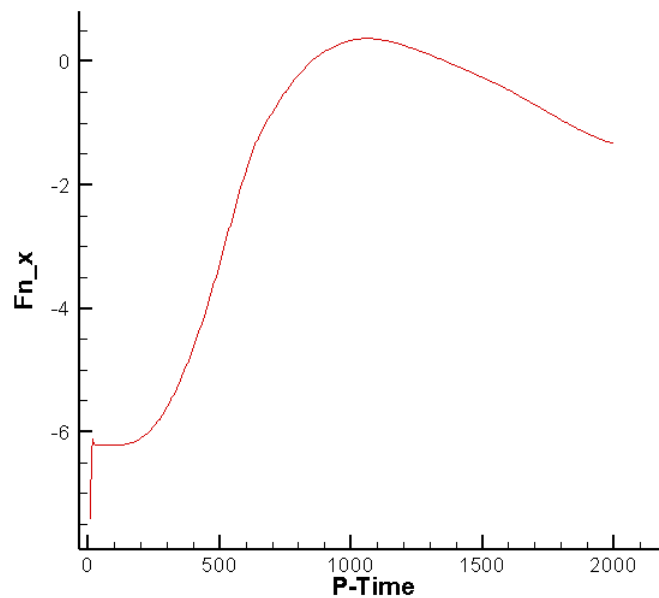


Figura 3.14: Andamento della forza nel tempo

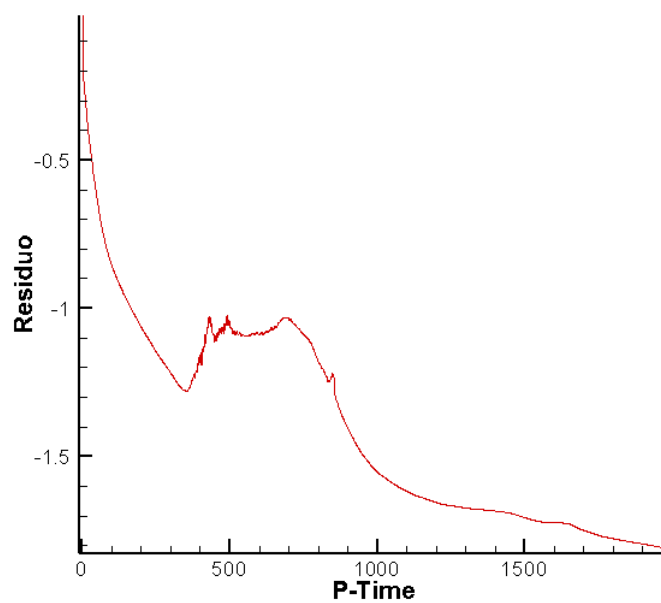


Figura 3.15: Andamento del residuo nel tempo

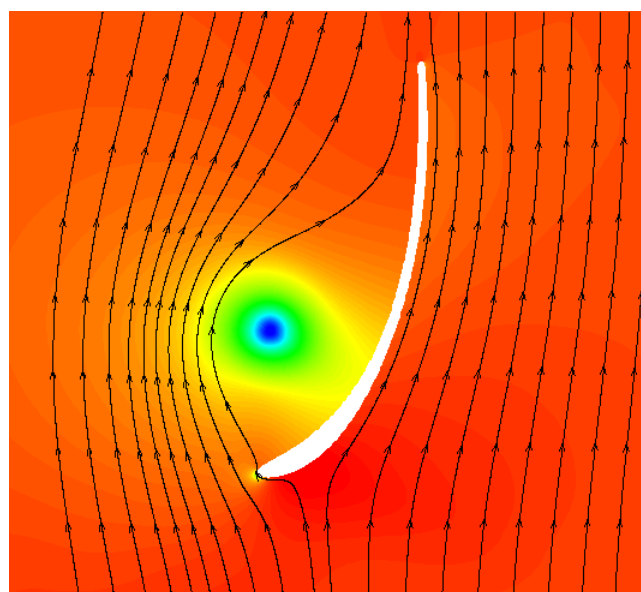


Figura 3.16: Campo di velocità attorno al profilo

## Capitolo 4

# Conclusioni

L'obiettivo del presente lavoro di tesi è stato lo studio preliminare del primo stadio di una turbina centrifuga, geometria della quale, sviluppata e ottimizzata all'interno del Dipartimento di Energia del Politecnico di Milano. In particolare si è voluto testare il software ROSITA disponibile dal Dipartimento per questo tipo di analisi e, di conseguenza, vedere il comportamento dell'algoritmo Chimera per la generazione della griglia composita. Lo studio della tecnica di tagging applicata su geometrie complesse ha permesso le seguenti conclusioni:

- Il metodo Chimera è una tecnica molto efficace per creare griglie di sistemi complessi evitando così di dover creare direttamente griglie non strutturate in maniera autonoma.
- Le griglie componenti, come già spiegato nel capitolo 2, devono essere quanto più possibile simili, non solo per quanto riguarda la grandezze, ma anche le forme. Le griglie di conseguenza devono avere una qualità quanto più possibile alta.
- All'aumentare del numero di celle all'interno delle griglie, cresce il tempo impiegato dall'algoritmo per la generazione delle griglia composita. Ciò può non essere un problema per un conto stazionario nel quale l'operazione è effettuata soltanto una volta prima di svolgere il conto fluidodinamico ma, in un conto dinamico, dove l'operazione va rifatta ad ogni istante di tempo, questo può gravare sui tempi di calcolo e di conseguenza sui costi. Per cogliere con sufficiente dettaglio gli effetti fluidodinamici sulla geometria desiderata, è necessario avere un numero di celle elevato. Di conseguenza bisogna ricercare un compromesso tra il numero di celle nella griglia e il tempo computazionale a disposizione.

Nella griglia analizzata nel presente lavoro è presente un elevato numero di griglie componenti con numerose sovrapposizioni. All'aumentare delle griglie componenti e delle zone di sovrapposizione, il tempo impiegato a generare la griglia composita cresce ulteriormente aumentando il rischio di mancata convergenza.

- Anche se l'algoritmo di tagging genera la griglia composita in maniera corretta, non è garantita la convergenza del conto fluidodinamico. Griglie componenti troppo vicine alla parete dei corpi fisici portano a zone dove si ha un passaggio molto ravvicinato tra zone sottili di punti validi, punti di bordo e punti cavi il che può causare problemi di convergenza.

La soluzione adottabile è aumentare la dimensione della griglia, accrescendo in questo modo le dimensioni delle zone di sovrapposizione. Bisogna prestare attenzione al fatto che in questo modo si possono avere sovrapposizioni con altre griglie componenti, facendo crescere i tempi di convergenza dell'algoritmo e il rischio di ripresentazione del problema sopracitato in altre zone.

## 4.1 Sviluppi futuri

Nella presente sezione alcune interessanti raccomandazioni sono suggerite per sviluppi futuri del lavoro presentato:

- La prima limitazione del lavoro svolto è dovuta al fatto che il software ROSITA permette di imporre come condizione al contorno soltanto il vettore velocità in maniera uniforme, definendone le tre componenti nel file di input. Di conseguenza la velocità in ingresso ha un'unica direzione che costringe l'utente a generare una griglia con un contorno retto, limitando lo studio a soltanto un settore della turbina. Per consentire lo studio dell'intera geometria, è necessario poter imporre il vettore velocità lungo un contorno curvo. Quest'operazione richiede una modifica di ROSITA, in modo che il software proietti il vettore velocità in ingresso lungo il versore normale a ciascun elemento di griglia appartenente al contorno come mostrato in Figura 4.1.

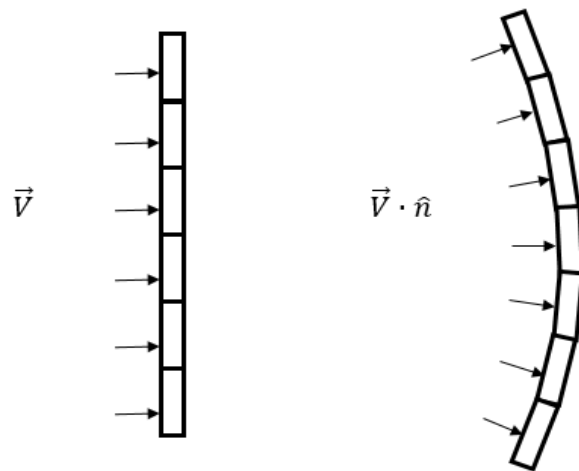


Figura 4.1: Condizioni al contorno

La procedura di tagging, invece, funziona anche per griglie circolari e, come mostrato nell'analisi di densità di griglia nel capitolo 3, si può utilizzare la griglia composta generata nel presente lavoro sia per il conto stazionario sia per quello dinamico del primo stadio nella sua interezza.

- Un successivo sviluppo rispetto ai presenti risultati, è il confronto con la simulazione dinamica della macchina. Per far ciò è necessario far muovere la schiera rotorica rispetto alla schiera statorica per un tempo sufficiente a poter apprezzare una soluzione a regime. Una simulazione di questo tipo, con un numero elevato di celle

necessario ad avere sufficiente accuratezza, richiede un considerevole tempo macchina per ottenere la soluzione. Il tempo per tale simulazione è inoltre prolungato dal fatto che il solutore ha la necessità di eseguire l'algoritmo di tagging per ottenere la griglia composita al passo temporale successivo e dal bisogno della verifica di consistenza tra le griglie in due istanti di tempo successivi. Per questo motivo, il solutore ROSITA mette a disposizione la possibilità di sfruttare la parallelizzazione del conto fluidodinamico se si è in possesso di sufficiente numero di unità di calcolo.

- Il solutore ROSITA, a prescindere dalla natura del gas del quale si vuole studiare il comportamento, lavora sempre con gas caloricamente perfetti e di conseguenza implementa al suo interno un modello di gas ideale:

$$\begin{aligned}
 P &= \rho RT \\
 T &= \frac{e}{c_v} = \frac{h}{c_p} \\
 R &= (\gamma - 1)c_v = \frac{\gamma - 1}{\gamma} c_p
 \end{aligned}
 \tag{4.1}$$

Questo modello non è rappresentativo della turbina centrifuga studiata in quanto il fluido di lavoro usato è il MDM (Octametiltrisilossano). Come si evince dal lavoro di tesi di Valerio Pendenza [4], esso si comporta come gas ideale in condizioni particolari che vengono raggiunte soltanto nel sesto stadio della turbina e non nel primo studiato del presente lavoro.

Sarebbe interessante implementare un modello di fluido più complesso per poter apprezzare il comportamento della macchina in diverse fasi nella quali opera, oppure utilizzare tabelle che raccolgono le caratteristiche del fluido in diverse fasi come suggerito dal lavoro di tesi sopracitato.

- Il lavoro di tesi studia soltanto il primo stadio della turbina, il quale è l'unico stadio che permette di trascurare gli effetti tridimensionali e di sfruttare una griglia bidimensionale. Gli stadi successivi della turbina, data la complessità, hanno un considerevole sviluppo in direzione assiale, rendendo obbligatorio uno studio tridimensionale come mostrato in Figura 4.2. Di conseguenza sarebbe interessante lo studio dell'intera macchina mediante una griglia tridimensionale complessa e l'analisi del comportamento del fluido causato dall'interazione tra gli stadi.

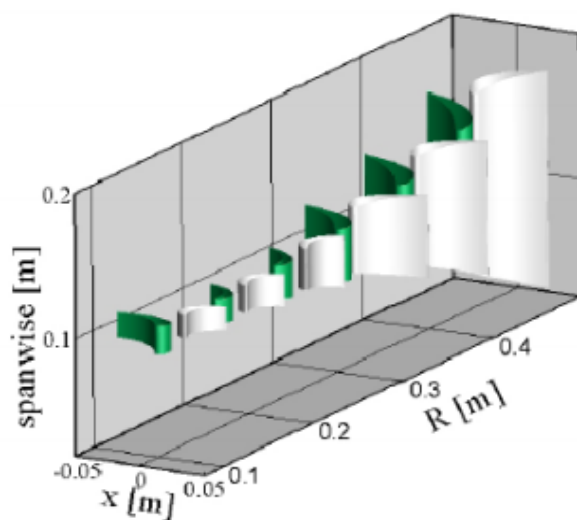


Figura 4.2: Sviluppo assiale degli stadi successivi

# Bibliografia

- [1] G. Chesshire and W. D. Henshaw. Composite overlapping meshes for the solution of partial differential equations. *J. Comp. Phys*, 1990.
- [2] W. M. Chan and P. G. Buning. Zipper grids for force and moment computation on overset grids. *AIAA Paper 95-1681-CP*.
- [3] M. Costes G. Dufour, B. François. Comparison of chimera and sliding mesh techniques for unsteady simulations of counter rotating open-rotors. 2011.
- [4] V. Pendenza. Progettazione e simulazione cfd di schiere di turbina centrifuga operanti in regime di gas denso, 2013.
- [5] M. Valentini M. Biava. *ROSITA V4.63, Rotorcraft Software Italy, Formulation and user manual*, 2013.

