

**TOR VERGATA**  
UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI ROMA

MACROAREA DI INGEGNERIA

CORSO DI LAUREA MAGISTRALE IN  
INGEGNERIA MECCANICA

**CALCOLO AEROELASTICO HIGH  
FIDELITY MEDIANTE HPC**

**Relatore:**

Marco E. Biancolini

**Candidato:**

Domenico Regine

**Correlatore:**

Corrado Groth

**Supervisore:**

Andrea Lopez

**2021/2022**

# Indice

<b>Introduzione</b>	<b>3</b>
<b>1 Richiami Teorici</b>	<b>6</b>
1.1 Teoria Modale . . . . .	6
1.2 Il Mesh Morphing . . . . .	10
1.3 Tecniche di Morphing . . . . .	12
1.4 Radial Basis Functions . . . . .	14
<b>2 Analisi FSI: Metodologie</b>	<b>20</b>
2.1 Aeroelasticità . . . . .	20
2.2 Strategie di Analisi FSI . . . . .	24
2.3 Sovrapposizione Modale . . . . .	25
2.4 Analisi Two-Ways . . . . .	27
<b>3 Strumenti Utilizzati</b>	<b>29</b>
3.1 Ansys Fluent . . . . .	29
3.2 Siemens NX Nastran . . . . .	31
3.3 RBF Morph . . . . .	33
3.3.1 Setup di RBF Morph . . . . .	35
3.3.2 Calcolo delle Soluzioni . . . . .	40
3.3.3 Preview e Morph . . . . .	43

---

<b>4</b>	<b>Piastra rettangolare</b>	<b>47</b>
4.1	Descrizione del modello . . . . .	47
4.2	Simulazioni e Risultati . . . . .	49
4.2.1	Strategia Two-ways . . . . .	50
4.2.2	Strategia di Sovrapposizione Modale . . . . .	58
<b>5</b>	<b>HIRENASD</b>	<b>67</b>
5.1	Descrizione del Modello . . . . .	67
5.2	Simulazioni e Risultati . . . . .	69
5.2.1	Strategia Two-Ways . . . . .	69
5.2.2	Strategia di Sovrapposizione Modale . . . . .	74
<b>6</b>	<b>Conclusioni e Sviluppi futuri</b>	<b>86</b>
<b>A</b>	<b>Automazione del Metodo Two-Ways</b>	<b>91</b>
<b>B</b>	<b>Ringraziamenti</b>	<b>97</b>
	<b>Bibliografia</b>	<b>99</b>

# Introduzione

Gli studi fluidodinamici stanno assumendo sempre più importanza in una moltitudine di campi ingegneristici. Tuttavia, nelle sole analisi aerodinamiche non si tiene conto degli effetti legati alla deformabilità strutturale, che spesso possono influenzare in maniera rilevante i risultati. Questo effetto è particolarmente evidente, e non può essere ignorato, in applicazioni nelle quali le strutture hanno un'elevata elasticità, come nel settore aerospaziale, o laddove la flessibilità della struttura è parte integrante del funzionamento di meccanismi, come nel campo biomedicale. Pertanto, la comunità scientifica si è concentrata molto su questo problema nel corso degli anni, portando allo sviluppo di varie metodologie per effettuare studi di interazione fluido-struttura (FSI, Fluid Structure Interaction) [1]. Per approfondimenti riguardo lo stato dell'arte delle analisi FSI si rimanda a [2], [3], [4], [5], [6], [7]. Alla luce di ciò, sono stati creati svariati approcci per studiare l'interazione tra fluido e struttura a vari livelli di dettaglio. Una prima classificazione di queste metodologie si può fare tramite la distinzione tra approcci *high fidelity* e *low fidelity*: nei primi, il fenomeno viene simulato con maggior precisione. Tuttavia, questa precisione ha un costo. Il bilanciamento tra il costo e la precisione dell'approccio high fidelity risulta importante nella fase di selezione degli opportuni strumenti numerici da utilizzare. Inoltre, si può affermare come la possibilità di affidarsi a studi high fidelity già durante le fasi iniziali dell'iter progettuale renda possibile la

riduzione dell'incertezza attesa nelle fasi di test, oltre a dare la possibilità di ridurre i tempi necessari per l'immissione del prodotto sul mercato [8].

Per quanto riguarda lo stato dell'arte delle analisi FSI high fidelity, si prevede un accoppiamento tra codici RANS (Reynolds Averaged Navier-Stokes) ed un solver strutturale (FEM, Finite Elements Method); la criticità di quest'accoppiamento consiste nella fase di scambio di informazioni tra i due software [8]. Le metodologie più adottate per l'implementazione di studi FSI sono tre: la prima, definita *One-Way*, parte dall'ipotesi di ritenere il fenomeno monodirezionale, ossia la fluidodinamica può influenzare il comportamento meccanico e termico di una struttura ma non può avvenire il viceversa, ovvero le deformazioni strutturali non hanno effetto sul campo termo-fluidodinamico. Invece, la seconda e la terza metodologia, definite rispettivamente *Two-Ways* e *sovrapposizione modale*, consentono di cogliere la mutua influenza tra i due suddetti fenomeni: il campo termo-fluidodinamico porta alle deformazioni strutturali e queste ultime sono in grado di causare variazioni sul dominio fluido. Si può evincere come queste ultime due metodologie siano più aderenti a quanto riscontrabile nella realtà, a prezzo però di una maggior complessità nell'impostazione e nello svolgimento della simulazione.

Nel lavoro di questa tesi ci si è concentrati nello svolgimento di analisi secondo le metodologie *Two-Ways* e di *sovrapposizione modale*. Normalmente, nello svolgimento di tali studi si ha la necessità di effettuare un'operazione di remeshing tra uno step ed il successivo, in quanto tra due step seguenti si avranno differenti configurazioni deformate della struttura in esame. Invece, la particolarità del lavoro svolto consiste nell'eliminazione di questo passaggio mediante la tecnica del *mesh morphing*, in maniera tale da deformare la struttura tra due step successivi senza la necessità di effettuare l'operazione di remeshing e comportando una notevole riduzione dei tempi di lavoro.

La strategia *Two-Ways* prevede la continua comunicazione tra il software di fluidodinamica computazionale (CFD, Computational Fluid Dynamics) ed un solver FEM; si procede esportando i carichi fluidodinamici risultanti dall'analisi CFD sul software FEM, si esegue quindi l'analisi strutturale, si esporta la configurazione deformata sul modello CFD e si esegue un nuovo studio fluidodinamico. Questi passaggi vengono ripetuti finché non si arriva alla convergenza degli spostamenti della struttura (in genere bastano 4-5 iterazioni). Le tecniche di *mesh morphing* vengono in tal caso implementate nell'ultimo passaggio della singola iterazione, ovvero nell'esportazione della deformata dal solver FEM al software CFD. La metodologia di *sovrapposizione modale* prevede invece l'esportazione della base modale della struttura dal solver FEM al software CFD, il tutto tramite il *mesh morpher*. Si elimina così la continua comunicazione tra i due software, rendendo il processo quasi automatico [9].

Il software di *mesh morphing* utilizzato in questo studio è denominato *RBF Morph<sup>TM</sup>*, in quanto basato su delle funzioni di interpolazione denominate *Radial Basis Functions* (RBF). Tali funzioni consentono il calcolo della soluzione del *morphing* partendo da una lista di punti sorgente (centri) e dai loro spostamenti.

Va sottolineato come l'analisi in base modale sia più facilmente implementabile, tuttavia essa non può gestire materiali con non linearità, problemi di contatto, componenti con pre-stress e casi non lineari con grandi spostamenti. Tali situazioni possono essere gestite con la strategia FSI Two-Ways [10].

Nel lavoro qui discusso si esegue un confronto tra l'approccio Two-Ways ed il metodo di sovrapposizione modale, con lo scopo di valutare la precisione dei due metodi.

# Capitolo 1

## Richiami Teorici

### 1.1 Coordinate Modali per Vibrazioni con N Gradi di Libertà

In questo paragrafo viene fornita una breve introduzione teorica riguardo il moto per N-gradi di libertà in coordinate modali. Per ulteriori dettagli a riguardo si può consultare [8], [9], [10], [11], [12], [13].

Il sistema di equazioni differenziali relative al moto di un sistema ad  $n$  gradi di libertà è esprimibile secondo l'equazione 1.1:

$$M\ddot{x} + C\dot{x} + Kx = f(t) \quad (1.1)$$

dove  $M$  è la matrice delle masse,  $C$  la matrice degli smorzamenti,  $K$  la matrice delle rigidità ed  $f(t)$  il vettore delle forzanti. Assumendo l'assenza di smorzamento viscoso e di forzanti, l'equazione 1.1 diventa l'equazione 1.2:

$$M\ddot{x} + Kx = 0 \quad (1.2)$$

È lecito assumere una risposta descritta da funzioni armoniche come riportato nell'equazione 1.3:

$$x = X \sin(\omega_n t - \phi) \quad (1.3)$$

con  $X$  e  $\phi$  che sono rispettivamente definite dalle condizioni al contorno 1.4 e 1.5:

$$X^2 = x_0^2 + \frac{\dot{x}_0^2}{\omega_n^2} \quad (1.4)$$

$$\tan \phi = \frac{\dot{x}_0}{x_0 \omega_n} \quad (1.5)$$

mentre  $\omega_n$  risulta invece definito dalla relazione 1.6:

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (1.6)$$

Andando a sostituire la risposta armonica del sistema, data dall'equazione 1.3, nell'equazione del moto non smorzato (1.2) si perviene all'equazione 1.7:

$$-\omega^2 M X + K X = 0 \quad (1.7)$$

la quale si può riscrivere nella forma riportata nella relazione 1.8, nota come equazione secolare:

$$[K - \omega^2 M] X = 0 \quad (1.8)$$

Va imposto che il determinante della matrice  $[K - \omega^2 M]$  sia nullo perché il sistema ammetta soluzioni non banali. Imponendo tale condizione si arriva al problema agli autovalori dell'analisi modale. Per il calcolo dei modi propri di vibrare (autovettori) e le rispettive frequenze (autovalori) va risolta l'equazione 1.8 nelle incognite  $\omega^2$ , per poi effettuare la verifica di risonanza.

Va sottolineato come sia necessario che la matrice delle masse  $M$  debba essere definita positiva e la matrice delle rigidità  $K$  debba essere semidefinita positiva perché gli autovalori siano soluzioni reali e positive.



Dato che gli autovettori godono della proprietà di ortogonalità, essi saranno linearmente indipendenti. Perciò, vale quanto riportato nell'equazione 1.9:

$$X_j^T M X_i = X_j^T K X_i = 0 \text{ per } i \neq j \quad (1.9)$$

Grazie alla loro ortogonalità, gli autovettori definiscono una base. Per disaccoppiare le equazioni del moto, si può operare un cambio di base dalla base normale a quella modale. In tal maniera, si avrà un set di equazioni aventi ciascuna una sola incognita. Tale cambio di base si può effettuare grazie all'introduzione del *vettore delle coordinate modali*  $q$ , il quale si può definire come nell'equazione 1.10:

$$q = X^{-1}x \quad (1.10)$$

con  $X$  che esprime la matrice modale, avente come vettori colonna gli autovettori normalizzati rispetto alla massa (equazione 1.11):

$$X = [X_1|X_2|\dots|X_n] \quad (1.11)$$

Si osservi che, per la condizione di ortogonalità 1.9, la matrice delle masse  $M$  deve rispettare la condizione 1.12:

$$X^T M X = I \quad (1.12)$$

Invece, la matrice delle rigidità porta all'ottenimento della matrice spettrale, come riportato nell'equazione 1.13:

$$\Omega = X^T K X = \begin{bmatrix} \omega_1^2 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \omega_2^2 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \ddots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & \omega_n^2 \end{bmatrix} \quad (1.13)$$

la quale ha gli autovalori disposti sulla diagonale principale, mentre il resto degli elementi risulta nullo. Sostituendo l'espressione 1.10, relativa alla definizione del vettore delle coordinate modali, nell'equazione del moto 1.1 si ottiene l'equazione 1.14:

$$MX\ddot{q} + CX\dot{q} + KXq = f(t) \quad (1.14)$$

Premoltiplicando ogni termine per  $X^T$ , ricordando le condizioni 1.12 e 1.13, si perviene all'espressione 1.15:

$$I\ddot{q} + X^T CX\dot{q} + \Omega q = X^T f(t) \quad (1.15)$$

Va imposto che la matrice  $X$  sia tale da diagonalizzare la matrice degli smorzamenti  $C$  affinché sia possibile disaccoppiare le equazioni del moto. Ciò è fattibile esprimendo la matrice degli smorzamenti  $C$  secondo il modello di Rayleigh, espresso nell'equazione 1.16:

$$C = \alpha M + \beta K \quad (1.16)$$

In base al modello proposto nell'equazione 1.16, la matrice degli smorzamenti  $C$  è data dalla combinazione lineare della matrice delle masse  $M$  e da quella delle rigidezze  $K$ . In tal maniera, si ha che la matrice degli smorzamenti  $C$  viene diagonalizzata dalla matrice modale  $X$ , e si può quindi pervenire alla forma disaccoppiata delle equazioni del moto 1.17:

$$M_{ii}\ddot{q}_i + C_{ii}\dot{q}_i + K_{ii}q_i = F_i(t) \quad (1.17)$$

Solitamente, l'equazione 1.17 viene posta come nella formulazione 1.18:

$$\ddot{q}_i + 2\zeta_i\omega_i\dot{q}_i + \omega_i^2 q_i = \frac{F_i(t)}{M_{ii}} \quad (1.18)$$

in cui  $\omega_i$  e  $\zeta_i$  sono rispettivamente la pulsazione naturale del sistema ed il fattore di smorzamento. Tali parametri vengono definiti dalle condizioni 1.19:

$$\omega_i = \sqrt{\frac{K_{ii}}{M_{ii}}} \quad \zeta_i = \frac{C_{ii}}{2M\omega_i} \quad (1.19)$$

Si vuole ora evidenziare il procedimento per ottenere la deformata di una struttura in coordinate normali facendo uso delle basi modali. In base all'equazione 1.10, si può esprimere la deformata di una struttura in coordinate normali come riportato nella formulazione 1.20:

$$x = Xq \quad (1.20)$$

dove i modi propri della struttura sono rappresentati dalle colonne della matrice  $X$ . In pratica, la deformata strutturale è data dalla combinazione dei modi di vibrare, i quali vengono pesati da un fattore di partecipazione  $q$ , il quale viene ricavato dalla risoluzione dell'equazione 1.18. Il risultato di questa operazione è riportato nella relazione 1.21:

$$q_i = \frac{F_i(t)}{\omega_i^2} \quad (1.21)$$

dove con  $q_i$  viene indicato l' $i$ -esimo fattore di partecipazione modale relativo all' $i$ -esimo modo di vibrare.

Si può evidenziare come i modi più basso-frequenziali avranno un fattore di partecipazione più elevato rispetto ai modi alto-frequenziali. Difatti, un qualsiasi sistema meccanico ha una caratteristica passa-basso, per cui i modi a frequenze minori avranno contenuti energetici più elevati, prevalendo sui modi a frequenze più elevate.

## 1.2 Il Mesh Morphing

Nel presente lavoro di tesi, si va ad effettuare un'analisi FSI seguendo due approcci differenti. Il denominatore comune tra le due strade percorse consiste nell'utilizzo di tecniche di mesh morphing.

In generale, un'analisi CFD si svolge in 3 fasi:

- preprocessing: viene sviluppato il modello geometrico della struttura di interesse e si va a generare la mesh su di esso, per poi andarvi ad applicare le condizioni al contorno;
- processing: si effettua l'impostazione e la risoluzione dell'analisi;
- postprocessing: vengono analizzati i risultati ottenuti.

Nell'approccio tradizionale per la risoluzione del problema dell'interazione fluido-struttura si effettuano varie operazioni di remeshing e rimodellazione, andando a gravare sulla fase di preprocessing e generando un elevato costo computazionale e temporale. Il mesh morphing consente la sostanziale eliminazione delle suddette operazioni, con conseguenti effetti positivi sui tempi di calcolo.

Il morphing è stato inizialmente impiegato nell'industria cinematografica. Se ne fa uso quando vi è la necessità di deformare con continuità un determinato soggetto, ad esempio per simulare una metamorfosi. Per conseguire questo scopo, all'operazione di morphing si aggiunge il warping, che basandosi su alcuni algoritmi matematici consente di modificare un'intera immagine andando ad intervenire soltanto sulla posizione di alcuni punti, denominati punti di controllo. Così facendo, si può realizzare una trasformazione partendo semplicemente dalle immagini iniziale e finale e lasciando al computer il compito di realizzare i diversi step intermedi [9].

Tale principio è alla base del mesh morphing: difatti, basta definire il moto di un determinato set di punti del sistema per ottenere la deformazione dell'intera mesh. Quest'ultimo aspetto dipende dagli algoritmi di smoothing, dai punti di controllo scelti e dal moto ad essi imposto. Effettuare un corretto controllo nel setup del mesh morpher risulta quindi cruciale. Le operazioni per effettuare tale setup verranno discusse nella sottosezione 3.3.1.

Si può quindi asserire come l'uso del mesh morpher consenta di velocizzare

sensibilmente le analisi FSI. Tuttavia, risulta fondamentale tenere traccia della deformazione delle celle della mesh CFD, in quanto la qualità e l'accuratezza della mesh influenzano fortemente la validità della soluzione. Va pertanto fatto sì che la distorsione degli elementi della mesh rientranti nel campo deformativo sia minima, e va inoltre preservata la forma degli elementi non rientranti in esso.

### 1.3 Tecniche di Morphing

Nelle analisi FSI la deformazione strutturale comporta un continuo spostamento dei confini del flusso. Si ricade in tale situazione quando si è in presenza di turbolenza.

Le tecniche di mesh morphing variano quando questa risulta essere strutturata o non strutturata. Nel primo caso, le posizioni dei nodi e degli elementi sono univocamente determinabili in base ad una fissata relazione di ordinamento, potendone quindi rappresentare gli elementi in un array. Ciò non avviene per le mesh non strutturate, per le quali risulta inoltre impossibile determinare la posizione di un elemento in base a quelli ad esso adiacenti. Quest'ultimo tipo di mesh trova tuttavia un impiego maggiore: difatti, nonostante sussista il bisogno di memorizzare la posizione di tutti i nodi, queste si adattano con facilità a geometrie complesse; inoltre, sono fruibili con notevole flessibilità e consentono la realizzazione di infittimenti localizzati (si riporta un esempio in figura 1.1). Ulteriori informazioni in merito sono disponibili in [9].

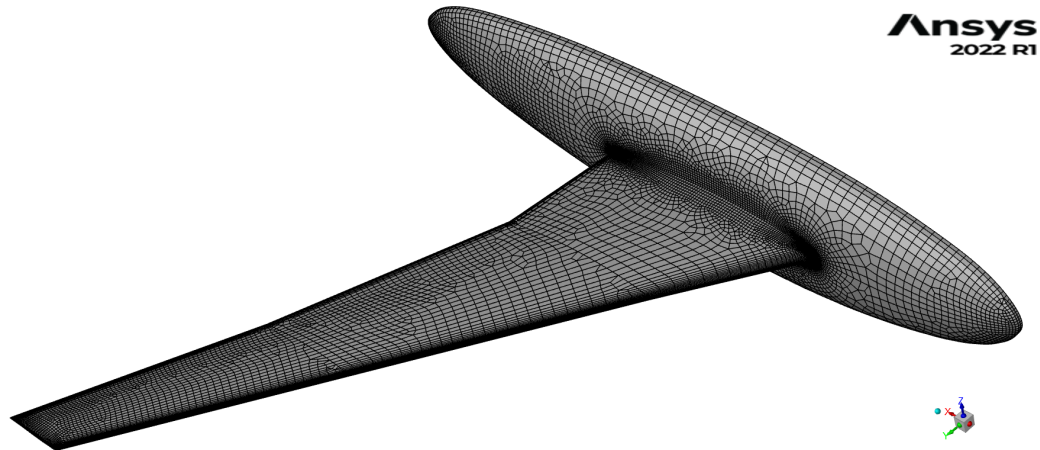


Figura 1.1: Mesh non strutturata per il caso HIRENASD

La tecnica più comune per la deformazione di mesh strutturate è nota come Transfinite Interpolation (TFI), secondo la quale si vanno ad interpolare gli spostamenti dei punti interni a partire dai punti dei bordi. Partendo dai punti di una curva madre, che rappresenta il bordo deformato, si sviluppano delle curve simili che si deformano con continuità all'interno della mesh fin quando queste assumono la forma della curva che ne definisce il bordo all'estremità opposta del dominio. Si possono seguire varie strategie per l'interpolazione: in quella lineare si utilizzano polinomi interpolanti del primo ordine, in quella di Hermite si fa uso dei polinomi di Hermite e si ha la stessa analogia per le Spline e le curve di Bezier. Partendo dai polinomi lineari ed arrivando alle curve di Bezier si ha man mano maggiore capacità di descrivere domini aventi geometrie più complesse, tuttavia tali tecniche non sono utilizzabili su mesh non strutturate [9].

Per questo secondo tipo di mesh si hanno a disposizione due diverse strategie:

- Tramite degli elementi molla (Spring Analogy), si introduce una connettività tra i nodi interni; tale approccio è basato su operatori Laplaciani e

Biarmonici. La mesh assumerà un comportamento pseudosolido, in cui la sollecitazione si propaga tramite determinate leggi fisiche;

- Non si ha la connessione tra i nodi in quanto ogni punto viene modificato individualmente soltanto in base alla posizione che ha nello spazio. Si adotta così uno schema point-by-point, il quale risulta meno oneroso computazionalmente ma fa sorgere la necessità dell'impiego di algoritmi di interpolazione.

Le Radial Basis Functions (RBF) sono l'algoritmo migliore per l'interpolazione dei dati: difatti, consentono l'esatta interpolazione di una funzione definita puntualmente senza che si commettano errori sui punti sorgente.

## 1.4 Radial Basis Functions

Le RBF sono da sempre state usate come tool per interpolare dati dispersi in uno spazio n-dimensionale. Possono interpolare ovunque una funzione scalare definita per punti discreti garantendo contemporaneamente il suo valore esatto nei punti originali. Si è poi passati all'uso delle RBF per applicazioni in vari campi scientifici, come il riconoscimento facciale, la realizzazione di mappe topografiche e la mappatura dei fondali oceanici. L'approccio utilizzato nelle RBF funziona anche laddove l'interpolazione polinomiale fallisce [10].

Vi sono varie tipologie di RBF. Una classificazione si può fare in base al tipo di supporto che hanno (globale o compatto), ovvero il set di punti dove la RBF scelta ha valore non nullo. La risoluzione del problema matematico delle RBF consiste nel calcolo dei parametri scalari del sistema lineare di ordine uguale al numero di punti sorgente considerati (ovvero i centri). Come per la strategia adottata in RBF Morph, la soluzione del sistema RBF, calcolata dopo che

siano stati definiti un set di punti sorgente e gli spostamenti ad essi corrispondenti, è utilizzata per effettuare il mesh morphing di un dominio discretizzato. Operativamente, dopo che i coefficienti RBF sono stati calcolati, lo spostamento di un punto arbitrario della mesh, interno (interpolazione) o esterno (estrapolazione) al dominio di influenza dei punti sorgente, si può esprimere come somma dei contributi radiali. La modifica desiderata delle posizioni dei nodi della mesh (smoothing) si può così realizzare rapidamente preservando la topologia della mesh in termini di numero totale e tipo di elementi che la costituiscono [10]. In figura 1.2 si può apprezzare la posizione dei punti sorgente per il caso HIRENASD, il quale sarà discusso nel capitolo 5.

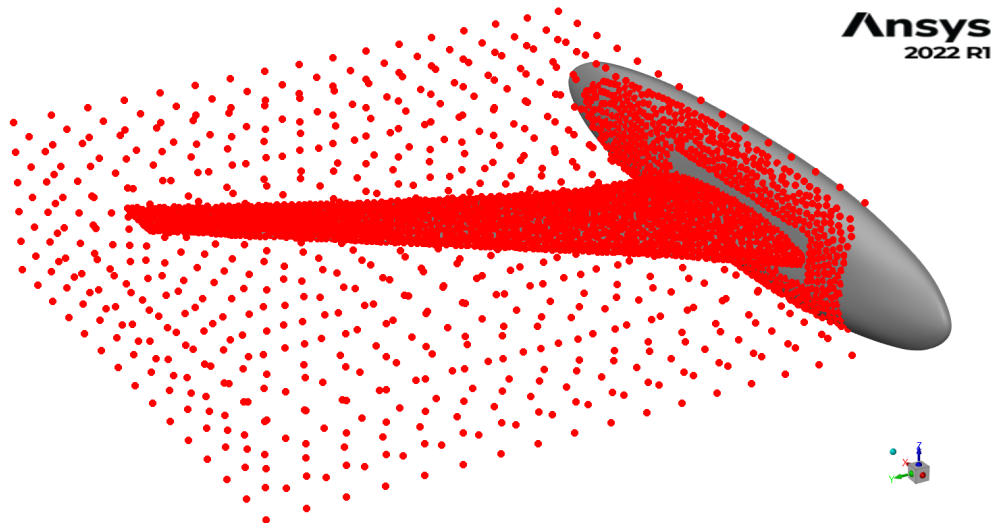


Figura 1.2: Punti sorgente per il caso HIRENASD

Per far sì che si possa effettuare uno studio tridimensionale nelle coordinate  $x$ ,  $y$  e  $z$ , RBF Morph si serve di un interpolante RBF, il quale è composto da una funzione di prova contenente la RBF  $\phi$  ed un vettore di correttori polinomiali multivariati  $h$  di ordine  $m-1$ , dove  $m$  è l'ordine di  $\phi$ , introdotto con lo scopo di garantire che in presenza di moti rigidi la soluzione esista. Le tipiche funzioni



RBF sono riportate in tabella 1.1.

RBF	$\phi(r)$
Spline type ( $R_n$ )	$ r ^n, n$ dispari
Thin plate spline ( $TPS_n$ )	$ r ^n \log  r , n$ pari
Multiquadratica	$\sqrt{1+r^2}$
Multiquadratica inversa	$\frac{1}{\sqrt{1+r^2}}$
Quadratica inversa	$\frac{1}{1+r^2}$
Gaussiana	$e^{-r^2}$

Tabella 1.1: Tipiche funzioni RBF [14]

La formulazione dell'interpolante è come riportato nell'equazione 1.22:

$$s(x) = \sum_{i=1}^{n_s} \gamma_i \phi(\|x - x_{k_i}\|) + h(x) \quad (1.22)$$

dove  $n_s$  indica qual è il numero di punti disponibili per effettuare l'interpolazione, ovvero i source points,  $\phi$  rappresenta la tipologia di base interpolante utilizzata,  $x$  è il vettore che identifica la posizione di un generico nodo appartenente alla mesh di superficie e/o di volume,  $x_{k_i}$  è il vettore posizione dell' $i$ -esimo nodo sorgente,  $\|x - x_{k_i}\|$  è la norma della distanza Euclidea tra due punti e  $h(x)$  sta ad indicare la correzione polinomiale da effettuare per garantire che i moti rigidi siano compatibili. Il fitting della soluzione RBF consiste nella stima del vettore dei coefficienti  $\gamma$  e dei pesi del correttore polinomiale  $\beta$  così che, nei punti sorgente, la funzione interpolante possenga lo specifico valore degli spostamenti (che è noto) [10]. In particolare, si pone la condizione 1.23.

$$s(x_{k_i}) = g_i, \text{ con } 1 \leq i \leq C \quad (1.23)$$

che va ad imporre che la funzione  $s(x)$  assuma il valore desiderato nei punti noti  $x_i$ . Va poi posta la condizione 1.24, che impone che i termini polinomiali

diano un contributo banale ai source points:

$$\sum_{i_1}^N \gamma_i p(x_k) = 0 \quad (1.24)$$

per tutti i polinomi  $p$  di grado minore od uguale a quello della polinomiale  $h$ . Si ha l'esistenza di un unico interpolatore qualora la funzione di base sia definita positiva e di ordine  $m \leq 2$ . Si può pertanto utilizzare una polinomiale lineare, come riportato nella formulazione 1.25.

$$h(x) = \beta_1 + \beta_2 x + \beta_3 y + \beta_4 z \quad (1.25)$$

Una conseguenza dell'utilizzo di una polinomiale lineare consiste nell'esatta rappresentazione dei moti rigidi. Dalla risoluzione del sistema 1.26 si possono ricavare i valori dei coefficienti  $\gamma$  della RBF e dei coefficienti  $\beta$  della polinomiale.

$$\begin{pmatrix} M & P \\ P^T & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \gamma \\ \beta \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} g \\ 0 \end{pmatrix} \quad (1.26)$$

laddove  $g$  rappresenta i valori noti nei punti sorgente ed  $M$  è la matrice di interpolazione, la quale viene definita dal calcolo di tutte le interazioni radiali tra i punti sorgente, in base all'equazione 1.27.

$$M_{ij} = \phi(|x_{k_i} - x_{k_j}|), \text{ con } 1 \leq i \leq C \text{ ed } 1 \leq j \leq C \quad (1.27)$$

$P$  è invece la matrice vincolare, ottenuta bilanciando i contributi polinomiali; la prima colonna presenta termini unitari, mentre le 3 rimanenti contengono le coordinate dei punti sorgente. La struttura di questa matrice è riportata nella formula 1.28.

$$P = \begin{pmatrix} 1 & x_{k1} & y_{k1} & z_{k1} \\ 1 & x_{k2} & y_{k2} & z_{k2} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & x_{kN} & y_{kN} & z_{kN} \end{pmatrix} \quad (1.28)$$

Il sistema 1.26 è risolvibile soltanto qualora la matrice  $M$  sia invertibile. Ciò è verificato per la maggior parte delle RBF. La risoluzione del sistema 1.26 posta all'ottenimento di  $\beta$  e  $\gamma$ , rispettivamente riportati nelle equazioni 1.29 e 1.30.

$$\beta = (P^T M^{-1} P)^{-1} P^T M^{-1} g \quad (1.29)$$

$$\gamma = M^{-1} g - M^{-1} P M P^T M^{-1} g \quad (1.30)$$

Dato che l'interpolazione in base radiale lavora con campi scalari, il problema di smoothing va risolto individuando le componenti scalari del campo di spostamenti. Dato che si lavora nello spazio tridimensionale, si perviene all'individuazione di tre equazioni, ovvero una per ogni componente scalare del campo di spostamenti, come si può apprezzare nel sistema 1.31.

$$\begin{cases} s_x(x) = \sum_{i=1}^{n_s} \gamma_i^x \phi(\|x - x_{k_i}\|) + \beta_1^x + \beta_2^x x + \beta_3^x y + \beta_4^x z \\ s_y(x) = \sum_{i=1}^{n_s} \gamma_i^y \phi(\|x - x_{k_i}\|) + \beta_1^y + \beta_2^y x + \beta_3^y y + \beta_4^y z \\ s_z(x) = \sum_{i=1}^{n_s} \gamma_i^z \phi(\|x - x_{k_i}\|) + \beta_1^z + \beta_2^z x + \beta_3^z y + \beta_4^z z \end{cases} \quad (1.31)$$

I metodi RBF offrono svariati vantaggi, tali da renderli molto attraenti nell'ambito del mesh smoothing. Uno dei più importanti è che, data la loro natura meshless, solo i punti della griglia vengono spostati indipendentemente dalle celle di volume a cui essi appartengono. Sono anche particolarmente adatti alla parallelizzazione, rendendo così possibile la gestione di casi di elevate dimensioni, i quali richiedono elevata potenza di calcolo. Una volta che le soluzioni RBF sono disponibili e condivise nella memoria di ogni nodo del cluster (ovvero in ogni processo), le singole partizioni hanno la possibilità di effettuare lo smoothing dei propri nodi senza considerare quanto accade esternamente.

Difatti, utilizzando una funzione di smoothing globale, non si hanno problemi di interfacce non corrispondenti in quanto la continuità su di esse è implicitamente garantita [15]. Ulteriori informazioni in merito sono disponibili in [9], [11], [12], [15].

# Capitolo 2

## Analisi FSI: Metodologie

### 2.1 Aeroelasticità

Nel computo di una tradizionale analisi CFD si perviene a risultati che non tengono conto della deformabilità strutturale, in quanto la struttura viene assunta rigida. È facilmente intuibile come ciò non sia compatibile con quanto avviene nella realtà, in quanto si avrà una continua interazione tra il fluido e la struttura che vi si trova immersa e viceversa. L'approccio tradizionale per lo studio di questo fenomeno si affida ad analisi in galleria del vento, ma ciò non è sempre fattibile. Tra gli svantaggi inerenti a questo approccio, ad esempio, vi è la necessità di costruire un prototipo o un modello in scala dell'oggetto in esame, con conseguenti costi finanziari e temporali rilevanti.

I fenomeni aerodinamici differiscono dai fenomeni aeroelastici: difatti, mentre i primi non dipendono dal moto relativo tra struttura e fluido e vedono forze in gioco dovute alla sola massa fluida incidente, i secondi sono dovuti al suddetto moto relativo e possono condurre alla generazione di forze autoeccitanti. In definitiva, in un fenomeno aerodinamico il moto della strutturale non è tale da influenzare le caratteristiche del flusso d'aria, a differenza di quanto accade

per i fenomeni aeroelastici.

Si possono dividere i moti di una struttura investita da un flusso in maniera simile a quanto appena fatto per fenomeni aeroelastici ed aerodinamici, classificandoli in oscillazioni forzate quando si è in presenza di forze aerodinamiche ed oscillazioni autoeccitate quando si ha a che fare con forze aeroelastiche. Nel caso delle oscillazioni forzate, qualora la forzante abbia una frequenza pari a quella naturale del sistema meccanico oscillante, si incorre nella risonanza, la quale va ad amplificare le sollecitazioni e gli spostamenti, che assumono valore infinito nel caso (teorico) di smorzamento nullo. Per la casistica delle oscillazioni autoeccitate, invece, la forzante dipenderà dal moto del sistema (come le forze elastiche, viscoso ed inerziali) e da determinati valori critici, i quali vanno a dividere la regione di stabilità, in cui il moto si smorza, da quella di instabilità dove il moto si amplifica. Inoltre, le forze autoeccitate, che sono di natura aeroelastica, causano un cambiamento nel comportamento strutturale andando a modificare le frequenze proprie ed i fattori di smorzamento della struttura [9], [16].

La classificazione generale dei fenomeni aeroelastici ed aerodinamici prevede la distinzione in fenomeni di aeroelasticità statica e dinamica, tra i quali si possono distinguere quattro categorie. Tra i fenomeni di aeroelasticità dinamica si possono annoverare:

- Vortex shedding e Lock-in: il Vortex Shedding, noto anche come distacco dei vortici di Von Kármán, si verifica quando un corpo non snello viene investito da un flusso laminare (purché si abbia a che fare con Reynolds maggiori di 40), il quale diventa instabile nella parte posteriore del corpo. Si assiste alla formazione di una scia di vortici instazionari e si ha una forza di Lift variabile nel tempo ma a media nulla [17] anche se il flusso incidente ha direzione ed intensità costanti. Tale fenomeno ha luogo in

particolare modo su corpi non snelli in quanto si verifica quando si assiste al distacco della vena fluida. In particolari condizioni, i vortici potrebbero distaccarsi con una frequenza pari a quella di risonanza della struttura, dando luogo ad un sincronismo che porta all'aumento dell'intensità della forza di portanza. Quest'ultimo fenomeno è denominato Lock-in, ed influisce sulla resistenza a fatica della struttura.

- Galloping: è un fenomeno di instabilità aerodinamica che avviene su strutture snelle, ovvero aventi la propria lunghezza caratteristica molto maggiore della loro sezione. Data l'asimmetria dei flussi tangenziali instauratisi sul corpo, si ha un carico di pressione oscillante che porta all'instaurazione di oscillazioni di grande ampiezza. Quando vale l'ipotesi di teoria quasi-statica, è necessario che la frequenza con cui si distaccano i vortici sia molto maggiore della principale frequenza vibrazionale della struttura perché si assista al Galloping. Può essere coinvolto un solo grado di libertà della struttura (oscillazioni solo flessionali o solo torsionali) o due gradi di libertà (oscillazioni flessionali e torsionali accoppiate).
- Flutter: si verifica grazie alle variazioni delle forze aerodinamiche, le quali derivano dal diverso posizionamento che le parti della struttura, a causa delle loro stesse oscillazioni, assumono rispetto alla direzione del vento incidente. Da questo fenomeno deriva una risposta oscillatoria, avente ampiezza, velocità ed accelerazione crescenti nel tempo. In tal maniera, si ha un trasferimento energetico dal fluido tale da annullare lo smorzamento strutturale. In uno scenario di instabilità, il carico indotto dallo spostamento viene ulteriormente incrementato dallo spostamento strutturale stesso, potendo quindi condurre a risultati catastrofici [18].

Invece, il fenomeno di aeroelasticità statica che possiamo distinguere è la di-

vergenza torsionale: si tratta di un fenomeno di instabilità statica dato dalla perdita di rigidità torsionale dovuto ad un momento torcente aerodinamico costante. La torsione della struttura porta ad un aumento dell'angolo di attacco (conducendo quindi ad un incremento della superficie investita dal vento), con conseguente crescita della forza agente sulla stessa, portando ad un aumento dello stress e quindi della deformazione. Se l'azione torcente supera la massima resistenza torsionale, si può giungere all'instabilità del sistema. La divergenza torsionale si verifica ad elevate velocità del flusso e riguarda strutture snelle, quali i profili alari o gli impalcati dei ponti, qualora le loro dimensioni allungate abbiano la stessa direzione del vento incidente, ed è l'unico fenomeno aeroelastico che non ha caratteristiche oscillatorie. Si possono visionare approfondimenti riguardo questi fenomeni in [9], [18] e [19].

Nella realtà, data la mutua influenza tra i fenomeni aerodinamici ed aeroelastici, risulta impossibile trovare un modo per separarli dal punto di vista della modellazione.

Lo studio dell'interazione fluido-struttura non assume importanza solamente nell'analisi dell'influenza sulle performance della deformazione strutturale, bensì riveste un ruolo chiave nella sicurezza qualora si abbia a che fare con strutture particolarmente esposte a fenomeni aerodinamici ed aeroelastici. Il flutter risulta particolarmente distruttivo a causa delle vibrazioni bassofrequenziali da esso generate: un esempio della pericolosità di tale fenomeno si può trovare nel crollo del Tacoma Narrows Bridge. Si può apprezzare la portata delle vibrazioni a bassa frequenza generate dal flutter nelle immagini antecedenti al crollo del suddetto ponte [20]: risulta immediatamente comprensibile l'importanza dello studio FSI anche per queste casistiche.

Le analisi FSI assumono particolare rilievo anche nella progettazione di aerei: difatti, nei nuovi velivoli si considera a posteriori la deformazione strutturale



delle ali. Sapendo che queste lavoreranno in una determinata configurazione deformata, si fa in modo che la deformata osservata a regime coincida con la configurazione in cui si osservano le massime performance. Esempi applicativi in cui viene esaminata l'influenza dei fenomeni qui esposti sulle performance di un aeromobile sono disponibili in [8], [10], [11], [12], [13].

## 2.2 Strategie di Analisi FSI

Le 3 strategie adottate in questa tesi per l'esecuzione di analisi FSI sono denominate One-Way, Two-Ways e sovrapposizione modale.

Nelle analisi One-Way si vanno ad esportare nel modello FEM i carichi derivanti dallo studio CFD, in maniera tale da studiare gli stress, le deformazioni ed altri eventuali parametri di interesse. Tale metodologia è definita One-Way in quanto prevede la sola esportazione di dati dal solver CFD al solver FEM e non viceversa: tale metodologia, pertanto, restituisce risultati approssimati.

La strategia One-Way viene perseguita nel campo della progettazione turbomacchinistica. Difatti, in tal caso lo scopo dell'analisi consiste unicamente nel verificare che la soluzione in esame soddisfi i requisiti strutturali.

Vista l'approssimazione riscontrabile nel metodo One-Way, sono state sviluppate due metodologie ulteriori, quali il metodo Two-Ways e la sovrapposizione modale. La prima strategia prevede la continua comunicazione tra il solver FEM ed il solver CFD: come per il metodo One-Way, vengono esportati i dati dal solver CFD al solver FEM e si esegue l'analisi strutturale. A differenza del metodo One-Way, vengono poi importate nel CFD le deformazioni calcolate dal solver FEM; si ripete quindi l'analisi CFD e si esegue nuovamente la procedura, fintantoché non si raggiunge la convergenza delle deformazioni. Per quanto riguarda la sovrapposizione modale, invece, i due solver comunicano

solo nella fase iniziale: vengono calcolati i modi di vibrare della struttura tramite il solver FEM, quindi vengono esportati nel solutore CFD per poi eseguire l'analisi.

Nell'ambito di questa tesi verranno seguiti il metodo Two-Ways e la sovrapposizione modale, in quanto forniscono risultati più accurati rispetto al metodo One-Way. In ambedue gli approcci seguiti ci si è basati sull'implementazione del mesh morphing RBF per trasferire i campi di spostamento dalla griglia strutturale dell'analisi FEM alla mesh CFD. Per ulteriori dettagli riguardo le metodologie di analisi FSI si rimanda a [8], [9], [10], [11], [12] e [13].

## 2.3 Sovrapposizione Modale

Il workflow seguito nel metodo di sovrapposizione modale viene basato su tre fasi, ovvero: Le tre fasi riconoscibili in questa tipologia di studio sono:

- *Fase 1*: i modi di vibrare delle parti deformabili normalizzati rispetto alla massa vengono calcolati tramite un'analisi FEM;
- *Fase 2*: una soluzione RBF viene calcolata per ogni modo di vibrare andando ad applicare gli spostamenti del corrispondente modo alle superfici deformabili;
- *Fase 3*: le soluzioni RBF calcolate vengono caricate all'inizio dell'analisi, così da fornire una formulazione parametrica della mesh che rende la configurazione fluidodinamica intrinsecamente aeroelastica [10].

Si riporta in figura 2.1 il workflow seguito con la strategia di sovrapposizione modale.

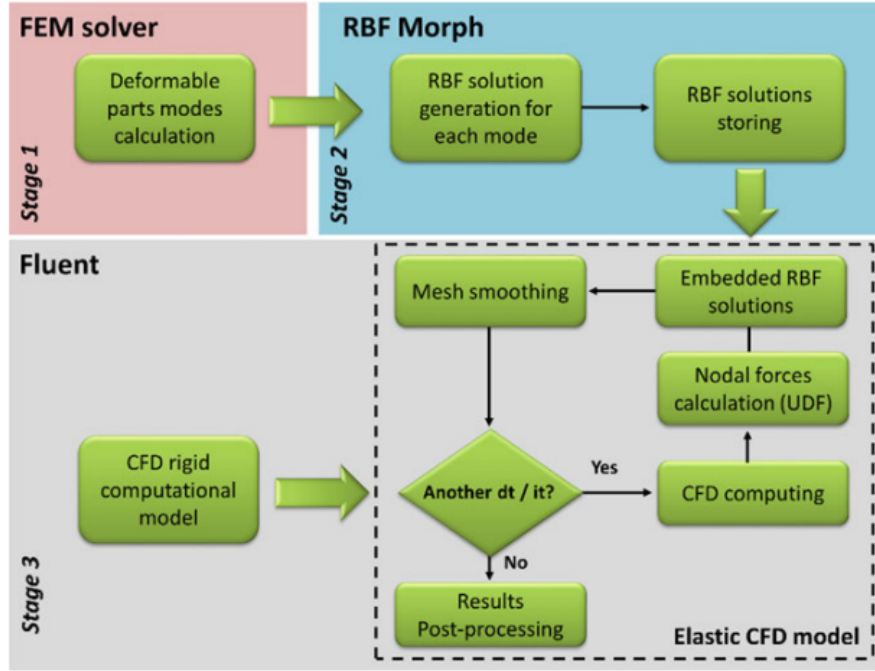


Figura 2.1: Workflow dell'analisi FSI di sovrapposizione modale

Si rimanda alla sottosezione 1.1 per visionare i calcoli effettuati dal solver.

La risposta strutturale viene valutata durante il calcolo CFD nello spazio modale. In base alla formula 2.1, la mesh viene resa parametrica:

$$x_{CFD} = x_{CFD0} + \sum_{m=1}^{n_{modi}} \mu_m u_{CFDm} \quad (2.1)$$

dove  $x_{CFD0}$  sono le posizioni dei nodi della mesh CFD relativa alla configurazione baseline (ovvero la configurazione indeformata),  $\mu_m$  sono i valori (incogniti) delle coordinate modali ed  $u_{CFD0}$  sono gli spostamenti modali per il generico modo m-esimo considerato.

Le forze modali  $N_m$  vengono integrate tramite la semplice sommatoria sui nodi delle forze nodali  $F_{CFD}$  calcolate su tutte le superfici (equazione 2.2):

$$N_m = \sum_{i=1}^{n_{nodi}} u_{CFDm_i} F_{CFD_i} \quad (2.2)$$

dove il carico modale m-esimo si ottiene sommando il prodotto vettoriale tra lo spostamento nodale del modo ed il carico nodale di ogni nodo i-esimo degli  $n_{nodi}$  della superficie. Si sottolinea inoltre il fatto che il carico modale m-esimo è uno scalare. Dato che per estrarre dei modi si è passati attraverso la definizione di un criterio di normalizzazione della massa, le coordinate modali per il problema statico vengono espresse secondo la relazione 2.3:

$$\eta_m = \frac{N_m}{\omega_m^2} \quad (2.3)$$

La mesh CFD parametrica può adattare la sua forma sulla base dei carichi agenti in base alla formula 2.4:

$$x_{CFD} = x_{CFD0} + \sum_{m=1}^{n_{modi}} \frac{N_m}{\omega_m^2} u_{CFDm} \quad (2.4)$$

## 2.4 Analisi Two-Ways

La strategia Two-Ways per le analisi FSI prevede anch'essa 3 step, riportati in figura 2.2.

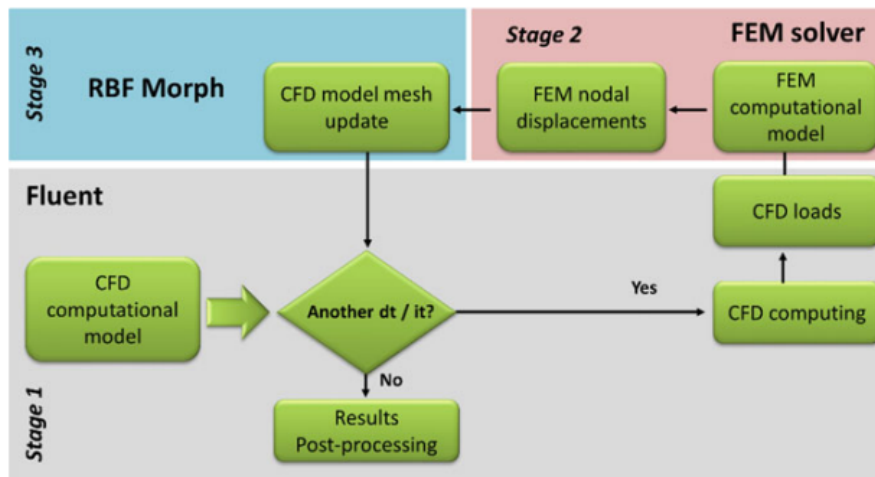


Figura 2.2: Workflow dell'analisi FSI Two-Ways

La procedura comincia con l'analisi CFD della geometria rigida (ovvero la configurazione baseline) fino ad una soluzione convergente. Quindi, si passa al calcolo degli spostamenti strutturali (ovvero le deformazioni) grazie all'importazione dei carichi derivanti dalla soluzione fluidodinamica ed infine adattando la mesh CFD alla configurazione deformata. Le iterazioni progrediscono fino alla convergenza caratterizzante la soluzione delle condizioni stazionarie; di solito, bastano 4-5 iterazioni [10].

Va sottolineato come sussista la necessità di eseguire una procedura di mapping dei carichi dalla mesh fluidodinamica a quella strutturale. In generale, tali mesh sono sovrapposte sulle superfici bagnate ma, dato che per necessità di calcolo le due griglie hanno densità e tipologie di elementi differenti, queste non risulteranno coincidenti. Risulta anche necessario effettuare il processo inverso, ovvero il trasferimento degli spostamenti dai risultati strutturali ottenuti sul modello FEM alla griglia CFD. In tal caso, risulterà necessario adattare l'intera mesh fluidodinamica alla nuova configurazione deformata.

# Capitolo 3

## Strumenti Utilizzati

### 3.1 Ansys Fluent

Per il calcolo CFD si è fatto uso di Ansys Fluent. Questo software offre la possibilità di impiegare solver RANS, adottati per flussi turbolenti. Il vantaggio derivante dall'impiego di tali algoritmi consiste nella possibilità di non simulare direttamente le fluttuazioni di turbolenza di piccola scala.

I solver RANS impiegano equazioni che governano il trasporto delle quantità legate al flusso mediate, con l'intero range delle scale di turbolenza che viene modellato. Quest'approccio riduce ampiamente i tempi computazionali richiesti per lo svolgimento delle analisi CFD, e trova largo impiego a livello ingegneristico. Questo tipo di algoritmo risolutivo necessita di un opportuno modello di chiusura: su Fluent sono disponibili il  $k - \epsilon$  e le sue relative varianti, il  $k - \omega$  con le sue varianti, l'*RSM* e lo *Spalart-Allmaras (S-A)* [21]. Nelle analisi esposte nella presente tesi, si è fatto uso di quest'ultimo modello di turbolenza in quanto fa uso di una sola equazione, rendendo il calcolo CFD più veloce.

Si vuole inoltre evidenziare come Fluent fornisca la possibilità di eseguire il

Mapping FSI, tramite il quale si possono esportare i carichi agenti sulla struttura in esame in vari formati, così da poterli importare in svariati solver FEM. Tale mapping si può effettuare sia su mesh di volume che su mesh di superficie. Nel corso della presente tesi, si è utilizzato il mapping superficiale. In particolare, questo tool va ad interpolare sulla mesh FEM i carichi calcolati sul modello CFD, fornendo come risultato gli stessi carichi applicati sulla mesh FEM. In figura 3.1 si riporta l'apposito pannello utilizzato per la procedura di Mapping FSI, dove si può apprezzare come sia possibile eseguire la scelta delle superfici su cui andare a effettuare il mapping.

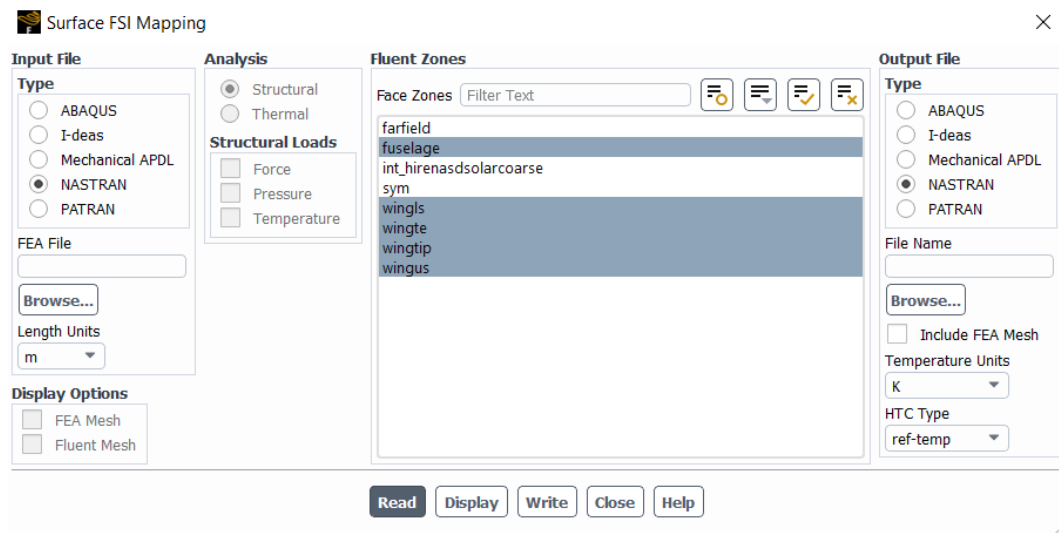


Figura 3.1: Schermata di Fluent per il Mapping FSI

La scelta riguardo l'utilizzo di Ansys Fluent è stata effettuata tenendo in conto l'integrazione con RBF Morph, i cui comandi si possono impartire direttamente nella TUI di Fluent. Ulteriori vantaggi derivanti dall'uso di questo solver CFD consistono nella disponibilità del tool di meshing e nell'integrazione con Spaceclaim, ovvero il software CAD di Ansys, rendendo facili e veloci le fasi di setup del modello CFD da analizzare.

Inoltre, Fluent è funzionante anche su Linux e sussiste la possibilità di eseguire le analisi anche senza l'apertura della sua interfaccia grafica, con effetti benefici sui tempi di calcolo. Fluent si può lanciare nel suddetto ambiente tramite un apposito comando, di seguito riportato:

```
fluent-path fluent 3ddp -t -g -i journal-name.jou
```

dove con *fluent-path* si indica il percorso in cui si trova l'eseguibile di Fluent, con *3ddp* si richiama l'utilizzo di un solver 3D a doppia precisione, con *-t* viene specificato il numero di core da utilizzare nell'analisi, che va opportunamente indicato dopo il suddetto comando (per esempio, per lanciare un'analisi utilizzando 20 core, la sintassi da utilizzare è *-t20*), con il comando *-g* si indica a Fluent di eseguire una run senza l'apertura dell'interfaccia grafica e con *-i* si va a richiamare un journal file, di estensione *.jou*, che deve essere specificato al posto della dicitura *journal-name.jou*.

Tramite i journal files, dato che possono contenere tutte le istruzioni necessarie per l'esecuzione di un'analisi CFD in Fluent, si possono automatizzare completamente le analisi svolte nel solver CFD stesso e, vista l'integrazione con RBF Morph, i comandi di quest'ultimo possono essere scritti direttamente all'interno di questi files, dando quindi la possibilità di automatizzare anche tutto ciò che concerne l'utilizzo del morpher. Si vuole infine sottolineare come i journal files siano modificabili tramite dei normali editor testuali.

## 3.2 Siemens NX Nastran

Come solver FEM si è fatto uso di Siemens NX Nastran. Un vantaggio derivante dall'utilizzo di Nastran consiste nella possibilità di realizzare degli opportuni files di input per le analisi, denominati *bulk data files*, i quali hanno estensione



.bdf. Tali files contengono tutte le informazioni relative al modello (quali i vincoli, gli elementi della mesh ed i carichi utilizzati) e sono modificabili tramite normali editor testuali.

Per la preparazione dei files di input si può agire da Windows utilizzando Siemens Femap, tramite il quale si riesce a dotare NX Nastran di un'interfaccia grafica. Agendo tramite Femap, si possono modificare con facilità i files .bdf da impiegare: difatti, è sufficiente effettuare il setup del modello FEM in questo ambiente per poi procedere con l'esportazione del file di input. Si vuole sottolineare come quest'operazione sia una semplificazione ma non sia strettamente necessaria, in quanto si ha a disposizione la guida del programma, consultabile in [22], contenente tutti i comandi del software, i quali possono essere inclusi manualmente sui files .bdf.

Una volta completato il setup del file di input, si avrà a disposizione un file .bdf pronto all'uso, il quale si potrà aprire anche in ambiente Linux per lo svolgimento delle analisi. In particolare, per lanciare Nastran nel suddetto sistema operativo si può impiegare il seguente comando:

$$\textit{nastran bdf-name.bdf batch=no}$$

in cui il comando *nastran* richiama il solver stesso, con *bdf-name.bdf* si indica il nome del file da cui eseguire l'analisi e con l'istruzione *batch=no* viene specificato che Nastran debba essere eseguito nel foreground anziché in background. Nella presente attività di tesi, quest'ultimo comando è stato utilizzato per far sì che il solver FEM venisse aperto nel momento opportuno, pena l'apertura contemporanea di Nastran e Fluent. Si rimanda all'appendice A per i dettagli operativi riguardanti la procedura automatica utilizzata.

### 3.3 RBF Morph

Il software RBF Morph è integrato in Ansys Fluent, fornendo quindi la possibilità di deformare la mesh CFD anche durante lo svolgimento delle analisi. Si avrà quindi la possibilità di effettuare modifiche di forma in maniera semplice e veloce: bastano pochi e semplici comandi, che si possono impartire a Fluent nella TUI o si possono direttamente includere all'interno del journal file. Si noti come le modifiche di forma imposte debbano rispettare la topologia della mesh. Pertanto, questo applicativo consente di semplificare e velocizzare una vasta branca di studi CFD, tra i quali a titolo di esempio possiamo citare gli studi di multi-configurazione, gli studi di sensibilità, i DOE (Design of Experiment), le ottimizzazioni di forma e gli studi FSI. Per ulteriori dettagli riguardo il software e per visionare esempi applicativi si possono consultare [12], [23] e [24].

Nonostante le caratteristiche molto avanzate di RBF Morph, vi è la possibilità di lavorare utilizzando la GUI in maniera semplice ed efficace. Oltre a ciò, con opportuni comandi si possono automatizzare intere analisi CFD che prevedono operazioni di mesh morphing intermedie.

Il funzionamento di RBF Morph è basato su una procedura a tre step, riportata in figura 3.2:



Figura 3.2: Step della procedura di RBF Morph

Analizzandoli nel dettaglio, i tre suddetti step sono:

1. Setup: definizione dei punti sorgente e degli spostamenti ad essi relativi. Viene eseguito in seriale;
2. Soluzione: viene impostato il sistema RBF risolutivo con la definizione del dominio di azione del morpher, per poi procedere al calcolo delle soluzioni. Viene eseguito in seriale;
3. Morphing della mesh superficiale e di volume. Viene eseguito in seriale o in parallelo.

Dalla GUI sono evidenti diversi differenti moduli per effettuare il setup del problema (Config, Encaps, Surfs, Points), una scheda per il calcolo delle soluzioni (Solve), un modulo per calcolare e combinare differenti soluzioni (Multi-Sol), un'opzione per visualizzare in anteprima i risultati dell'operazione di morphing (Preview), un modulo per effettuare l'operazione di Morphing (Morph), una scheda in cui sono presenti le impostazioni del programma ed un modulo per applicare i risultati del morphing al CAD (figura 3.3).

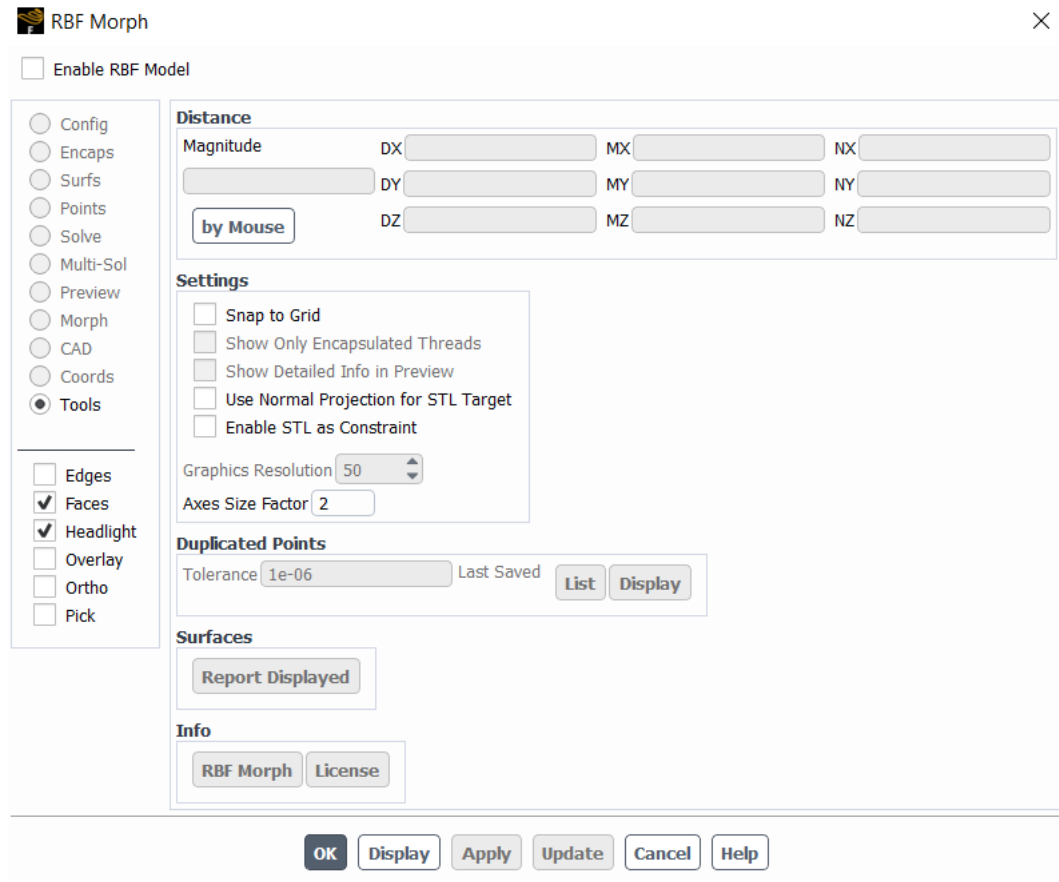


Figura 3.3: Schermata principale di RBF Morph

Nella trattazione verranno descritti unicamente i moduli utilizzati nello svolgimento della presente tesi.

### 3.3.1 Setup di RBF Morph

Il modulo Encaps permette di impostare il dominio su cui andrà ad agire RBF Morph. In particolare, si può definire lo stesso come fisso o mobile, e si può impostare una forma parallelepipedica, cilindrica o sferica (figura 3.4).

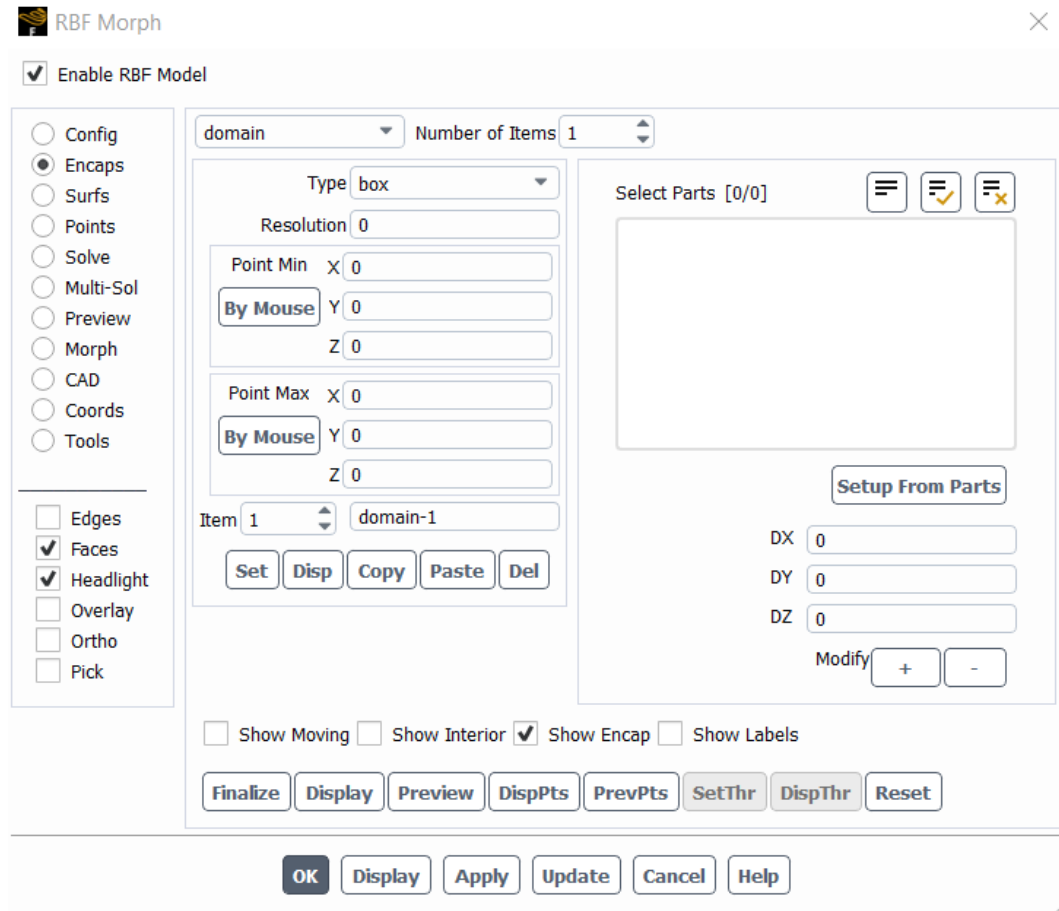


Figura 3.4: Schermata per l'impostazione del dominio di RBF Morph

Va sottolineata l'importanza dell'opzione Resolution, tramite la quale si definisce quanto debba essere fitto il campionamento dei punti. Difatti, una risoluzione troppo bassa potrebbe portare ad un campionamento insufficiente, con conseguenti imprecisioni nelle operazioni successive al setup. Al contrario, la scelta di un numero eccessivo di punti di campionamento porterebbe solamente ad un incremento dei tempi di calcolo, senza apportare vantaggi tangibili in termini di precisione.

La scheda Surfs, visibile in figura 3.5, fornisce la possibilità di selezionare i punti sorgente dalle superfici della mesh, purché queste siano state associate

in precedenza ad una named selection. In particolare, si possono selezionare i punti appartenenti ad un bordo tramite l'opzione Select Borders oppure si possono selezionare i punti relativi ad un'intera superficie con l'opzione Select Surface.

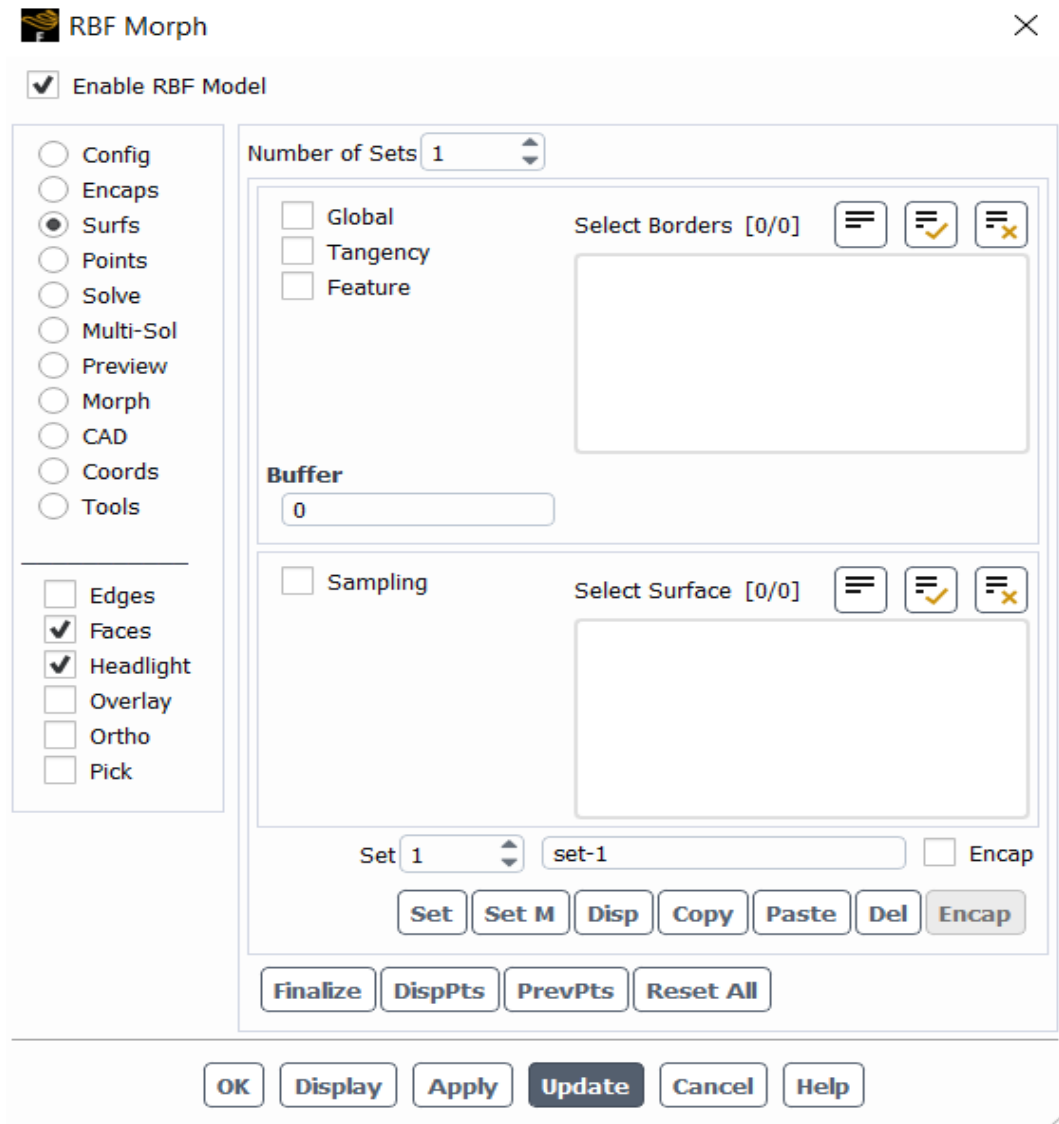


Figura 3.5: Schermata per la selezione delle superfici di RBF Morph

Inoltre, tramite l'opzione Set M (riportata in figura 3.6) si può decidere di impostare un determinato spostamento alle superfici selezionate.

**Set Motion** [X]

Entity **1** **set-1**

Motion Type **rigid**

Coordinate System **global**

DX **0**

DY **0**

DZ **0**

@ (deg) **0**

A1 X **0**

A1 Y **0**

A1 Z **0**

A2 X **0**

A2 Y **0**

A2 Z **0**

**Display Axis**

**Set** **Copy** **Paste** **Reset**

**OK** **Cancel** **Help**

Figura 3.6: Schermata per l'impostazione del campo di moto per le superfici selezionate nel pannello Surfs

Se si vuole invece imporre che una determinata superficie rimanga fissa, si può utilizzare la stessa opzione Set M imponendo uno spostamento nullo.

Sempre dal pannello Surfs, si può andare a definire un Encap cliccando sull'apposita checkbox. Si verrà rimandati al modulo Encaps con l'opzione Selection impostata (come visibile in figura 3.7), da cui si potrà definire un dominio che permette di selezionare solo una parte della superficie selezionata nel modulo Surfs. Sussiste sempre la possibilità di scegliere una forma parallelepipedica, sferica o cilindrica per lo stesso.

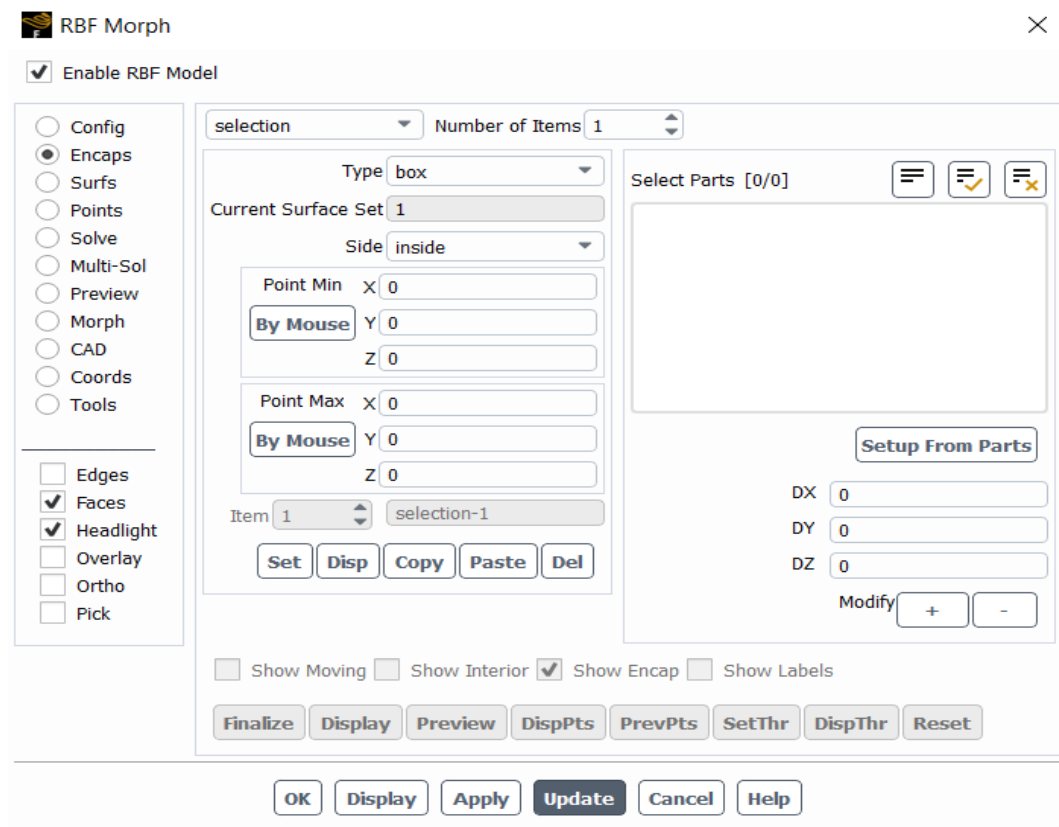


Figura 3.7: Modulo per l'impostazione del dominio per le superfici selezionate nel pannello Surfs

Va evidenziata la presenza di un menu a tendina denominato Side: di default si trova impostata la voce inside, con la quale si vanno a selezionare i soli punti interni al dominio qui definito, ma si può anche impostare l'opzione outside,



tramite la quale si vanno a selezionare i soli punti esterni al suddetto dominio. Una volta terminata la fase di setup, bisogna cliccare sull'opzione Finalize per far sì che il morpher acquisisca i punti di interesse.

### 3.3.2 Calcolo delle Soluzioni

Il secondo step seguito da RBF Morph prevede il calcolo delle soluzioni. Quest'operazione può essere effettuata tramite i moduli Solve e Multi-Sol. Si riporta in figura 3.8 quanto visibile nel pannello Solve.

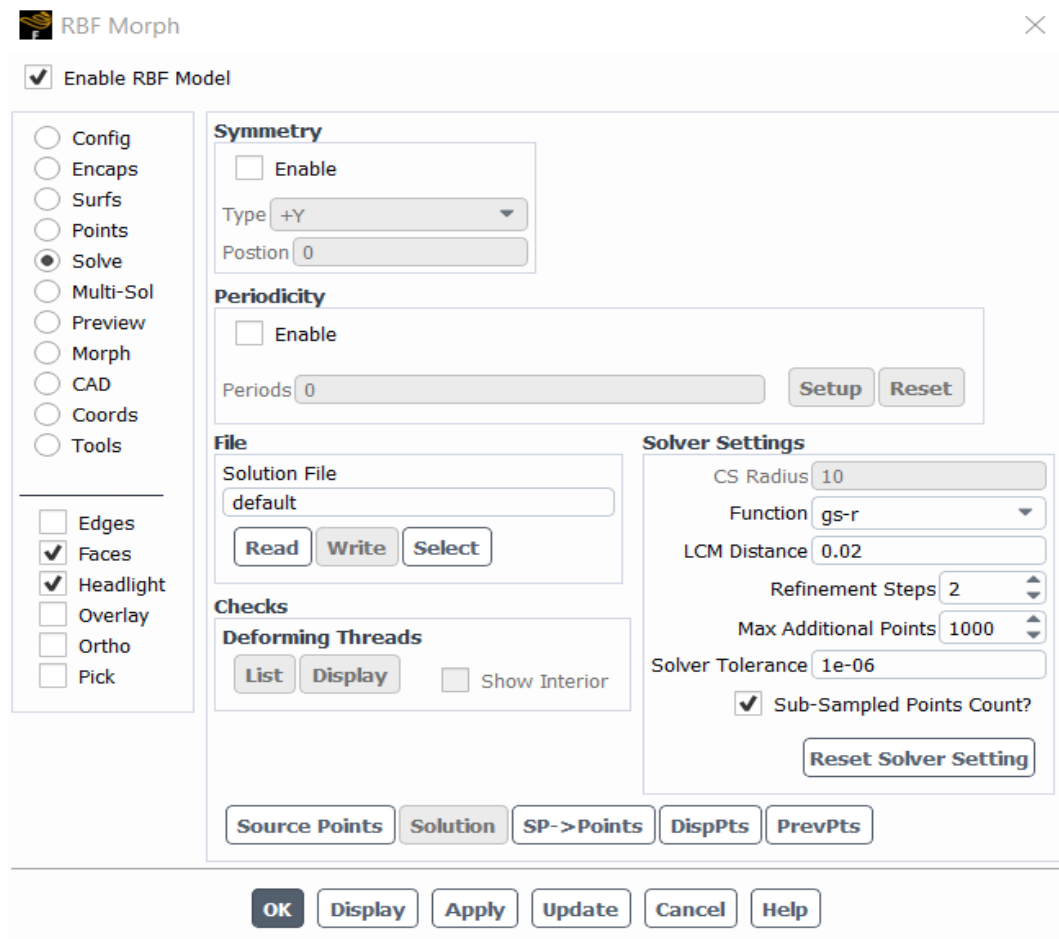


Figura 3.8: Schermata per il calcolo della soluzione

In questo modulo si può andare a leggere un file soluzione (in formato .sol) già esistente tramite l'opzione Read, oppure si può andare a scrivere un nuovo file soluzione tramite l'opzione Write. Il pulsante Select, invece, consente di caricare un file soluzione posizionato in una cartella diversa da quella di lavoro, selezionata all'avvio di Fluent.

Per calcolare una soluzione, bisogna innanzitutto premere sul bottone Source Points per far sì che il morpher calcoli i punti sorgente. Una volta che il morpher ha terminato il calcolo di questi, bisogna andare a cliccare sul pulsante Solution per far sì che il morpher calcoli la soluzione. Infine, si possono visualizzare i punti sorgente tramite l'opzione DispPts, mentre il bottone PrevPts consente di visualizzare un'anteprima dello spostamento compiuto dagli stessi. Un esempio di quanto visibile con l'opzione DispPts è visibile in figura 3.9, mentre con l'opzione PrevPts si ottiene quanto riportato in figura 3.10.

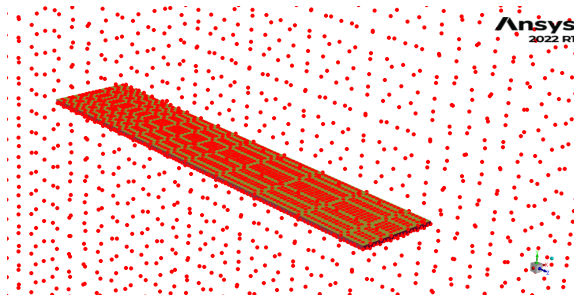


Figura 3.9: Risultato dell'operazione DispPts

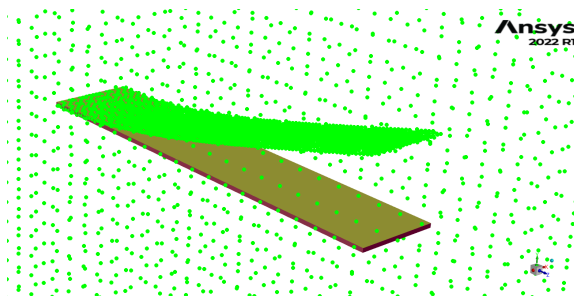


Figura 3.10: Risultato dell'operazione PrevPts

Sempre per quanto riguarda il pannello Solve, va infine rimarcato come sia possibile effettuare la scelta sulla funzione RBF da utilizzare tramite l'opzione Solver Settings. Si possono inoltre impostare altri parametri del solutore, tra cui troviamo la tolleranza dello stesso e la LCM distance.

Il pannello Multi-Sol, riportato in figura 3.11, consente di combinare più soluzioni, a patto che queste siano state già calcolate singolarmente tramite il modulo Solve. Si può anche andare ad agire sul fattore di amplificazione delle varie soluzioni ivi inserite.

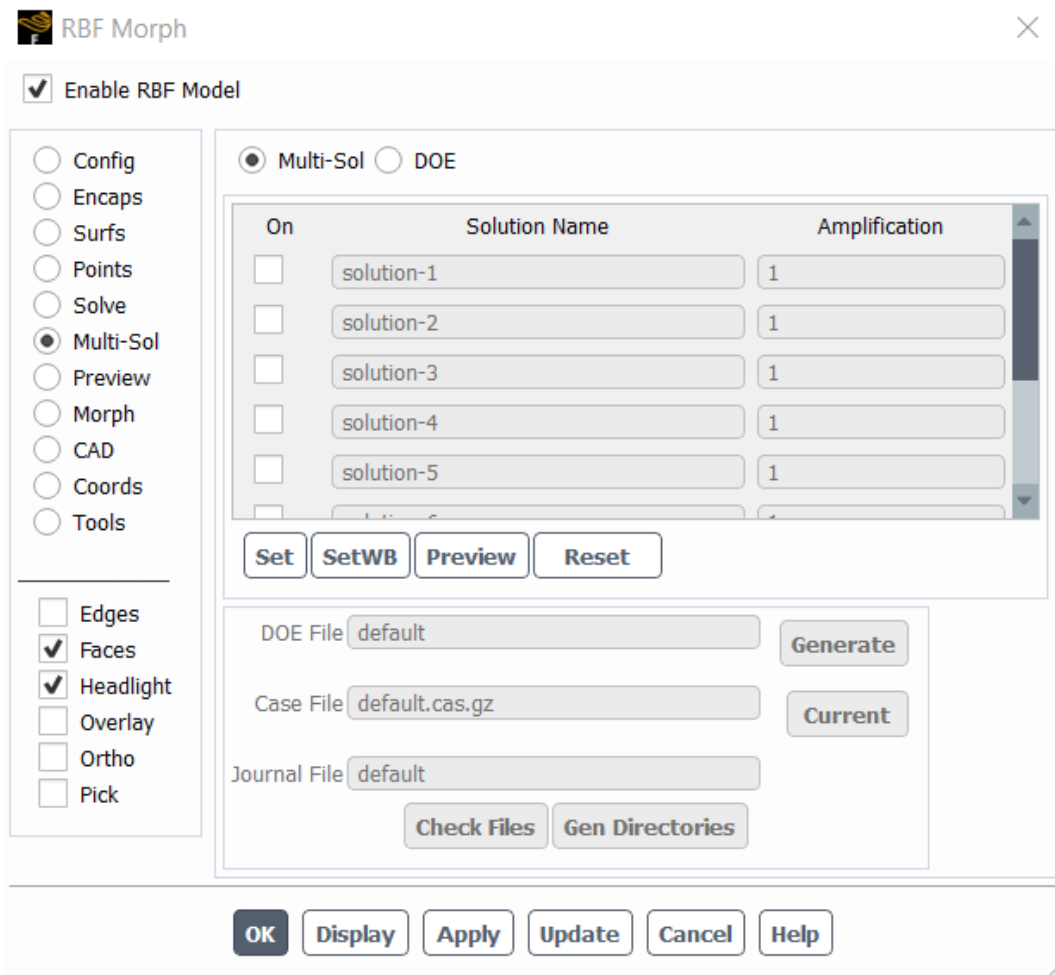


Figura 3.11: Modulo Multi-Sol

Ogni operazione effettuabile tramite la GUI di RBF Morph si può attuare anche tramite opportuni comandi, che possono essere inseriti nella TUI di Fluent o possono essere inclusi direttamente nel file di input di Fluent (ovvero il journal file). Il comando corrispondente all'operazione Multi-Sol è il seguente:

$$(rbf-morph '("sol-1" amp-1) ("sol-2" amp-2) ... ("sol-n" amp-n)))$$

dove al posto di sol-1, sol-2, etc. vanno scritti i nomi delle soluzioni di interesse ed al posto dei vari amp-1, amp-2 e così via va riportato il valore numerico del desiderato fattore di amplificazione. Oltre a combinare le varie soluzioni, tale comando esegue anche l'operazione di morphing. Va sottolineato come, con questa sintassi, se si andasse ad eseguire una seconda operazione di morphing la corrispondente soluzione sarà sovrapposta alla precedente. Ci sono due alternative per evitare ciò: si può utilizzare il comando di morphing sequenziale (*rbf-fmorph*) oppure si può utilizzare il morphing con l'opzione di annullamento abilitata (*rbf-morph-undo-enabled*). Con questa seconda strategia, quando l'analisi giunge a compimento bisogna utilizzare il comando di annullamento del morphing, ovvero (*morph-undo*), per riportare la geometria nella sua configurazione iniziale. Quindi, qualora necessario si può proseguire eseguendo una nuova operazione di morphing. Per visionare ulteriori comandi ed approfondimenti in merito si rimanda a [24].

### 3.3.3 Preview e Morph

In questa sezione verranno discussi il pannello che permette di visualizzare l'anteprima del risultato dell'operazione di morphing (Preview) e quello che consente di effettuare l'operazione di morphing stessa (Morph).

Il pannello Preview, riportato in figura 3.12, si attiva solo qualora una o più soluzioni vengano calcolate. L'operazione di preview non va ad alterare il

modello, in quanto consiste in una semplice anteprima di quanto si andrebbe ad ottenere eseguendo l'operazione di morphing.

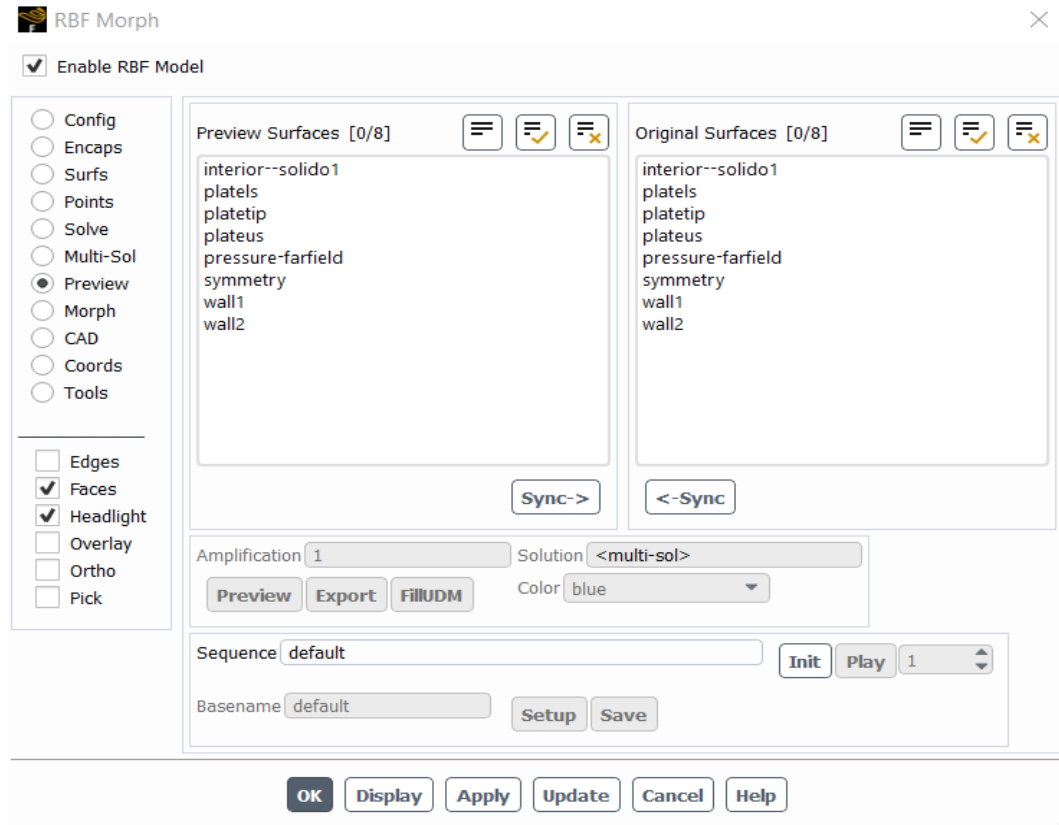


Figura 3.12: Scheda per l'operazione di Preview

Nella schermata del suddetto modulo, si possono selezionare nella tabella Preview Surfaces le superfici di cui si vuole visualizzare in anteprima il risultato del morphing, mentre nella tabella Original Surfaces si possono selezionare le superfici di cui si vuole visualizzare la configurazione originale. Il tasto Sync permette di rendere uguali le selezioni tra le due tabelle, in maniera tale da poter effettuare un confronto tra la geometria indeformata e quella deformata. Un esempio di un risultato per l'operazione di preview si può apprezzare in figura 3.13. Va inoltre evidenziato come sia possibile variare il fattore di ampli-

ficazione, così da poter visualizzare con facilità gli effetti di uno spostamento maggiore o minore. Infine, sempre dal pannello Preview, si possono salvare immagini e realizzare filmati.

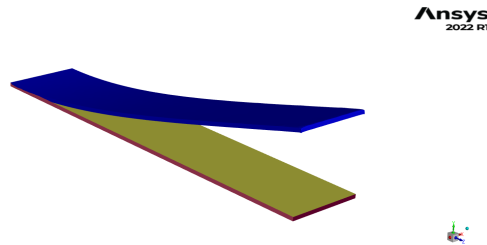


Figura 3.13: Risultato di un'operazione di preview

L'operazione di morphing viene gestita dal modulo Morph, riportato in figura 3.14.

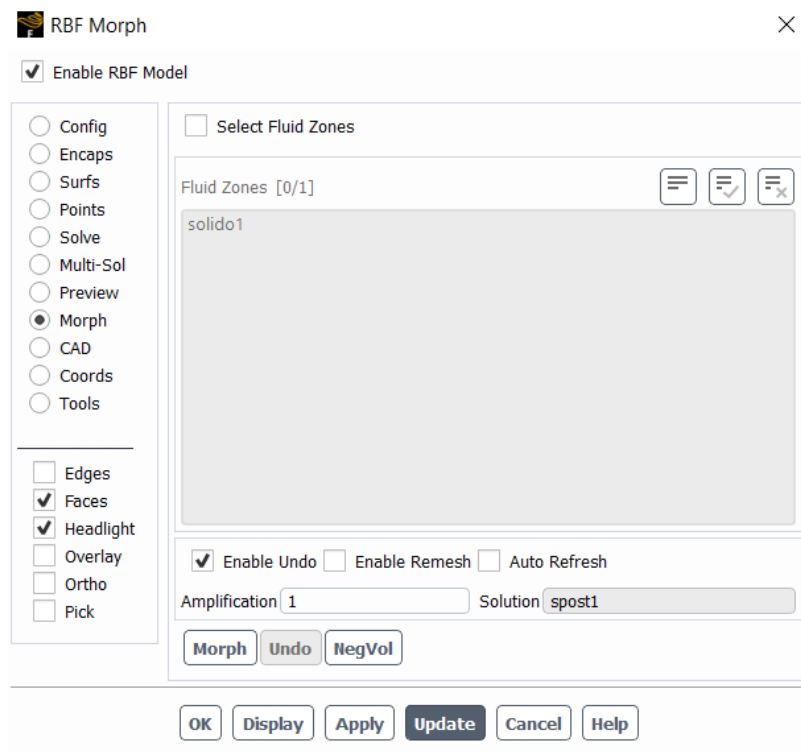


Figura 3.14: Modulo Morph

Premendo il pulsante Morph la mesh viene modificata secondo la soluzione salvata; anche in questo modulo si può variare il fattore di amplificazione. Mettendo la spunta sulla checkbox Enable Undo si va ad abilitare il pulsante Undo, il quale permette di annullare l'operazione di morphing effettuata. Qualora si andassero ad imporre spostamenti troppo elevati, l'operazione di morphing potrebbe non arrivare a compimento portando alla generazione di volumi negativi, visualizzabili utilizzando il bottone NegVol. Invece, qualora il morphing andasse a generare una mesh la cui skewness superi un valore di soglia prestabilito, verrà restituito un warning senza che l'operazione di morphing venga arrestata. Per fornire un esempio si riporta in figura 3.15 il risultato di un'operazione di morphing.

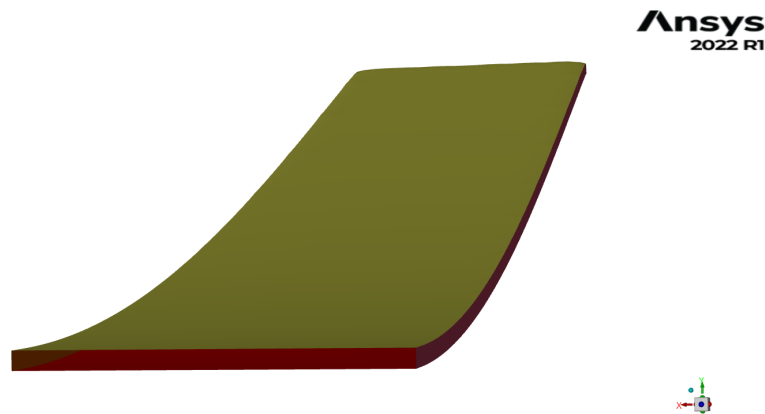


Figura 3.15: Risultato di un'operazione di morphing

# Capitolo 4

## Piastra rettangolare

### 4.1 Descrizione del modello

Con lo scopo di verificare il funzionamento dei workflow dell'analisi Two-Ways e della sovrapposizione modale, è stata creata una casistica semplice. Il modello sviluppato consiste in una piastra rettangolare incastrata in un'estremità e libera nell'altra, e questa viene investita da un flusso con un angolo di attacco pari a  $20^\circ$ . Come primo passo si è definita la geometria su Nastran, che si può vedere in figura 4.1, ed è stato imposto il vincolo in una delle sue estremità.

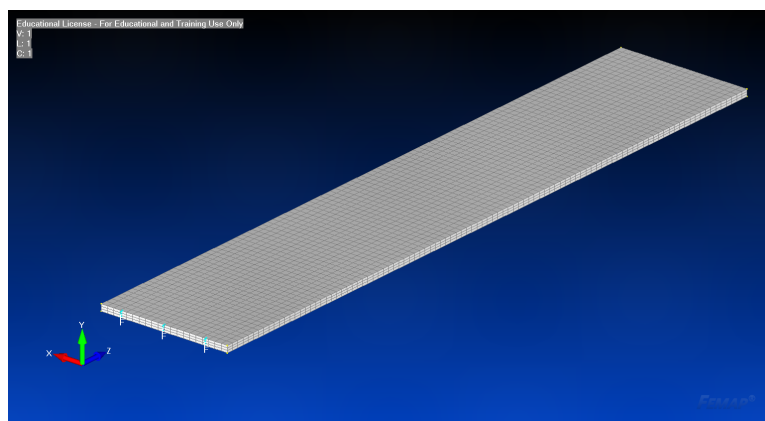


Figura 4.1: Geometria della piastra su Nastran



Una volta definita la geometria, è stata realizzata una mesh di volume (visibile in figura 4.1). A partire da questa è stata definita una mesh di superficie, riportata in figura 4.2; si può distinguere dalla mesh di volume grazie all'assenza della superficie di azione del vincolo. Lo scopo di questa mesh superficiale consiste nel permettere l'esportazione dei carichi da Fluent calcolandoli sulle sole superfici esterne, ovvero le superfici bagnate. Per effettuare questo trasferimento di carichi è stato utilizzato il tool di FSI Mapping integrato in Ansys Fluent, di cui si spiega il funzionamento nella sottosezione 3.1

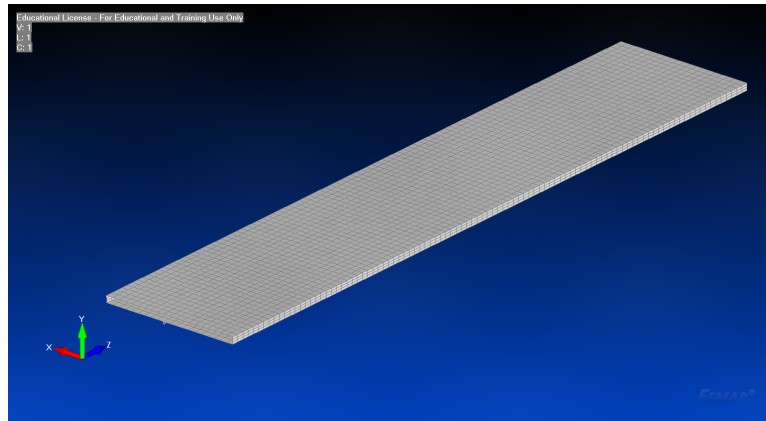


Figura 4.2: Mesh di superficie

Va sottolineato come sia necessario controllare la correttezza del verso delle normali di suddetta mesh: difatti, per avere una corretta esportazione dei carichi da Fluent ed una conseguente buona importazione su Nastran risulta necessario avere le normali rivolte verso l'esterno del corpo. Una volta definita la mesh superficiale, è stata creata un'analisi di comodo priva di carichi con lo scopo di esportare unicamente questa mesh in un file in formato .bdf. Infine, si è provveduto ad esportare la geometria da Femap, così da poter svolgere il setup del modello su Fluent.

Dal lato del solver CFD, il primo passo è stata la creazione del dominio fluido,

optando per una forma semisferica, e la definizione della mesh tramite il Mesher di Fluent stesso. In figura 4.3 si può apprezzare la mesh del dominio.

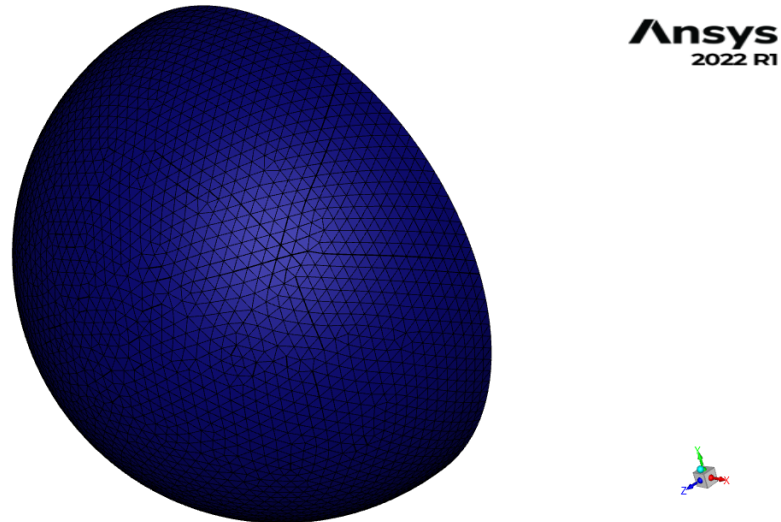


Figura 4.3: Mesh del dominio fluido

Si è quindi proceduto all'impostazione delle condizioni al contorno. Come primo passo si è definita l'aria come fluido di lavoro, abilitando l'ipotesi di gas perfetto. Quindi, per impostare la velocità del flusso è stato inserito un numero di Mach pari a 0.6, con un angolo di incidenza di  $20^\circ$  così da generare deformazioni apprezzabili della geometria in esame. Come materiale del corpo è stato scelto l'alluminio, il quale ha un modulo elastico relativamente basso: in tal maniera si avranno maggiori deformazioni strutturali.

## 4.2 Simulazioni e Risultati

Nella presente sezione verranno illustrati i risultati a cui si è pervenuti seguendo i workflow Two-Ways e di sovrapposizione modale.

### 4.2.1 Strategia Two-ways

Come descritto nel capitolo 2, dopo aver effettuato una simulazione CFD sulla geometria rigida, si è provveduto ad esportare i carichi risultanti da Fluent a Nastran; in figura 4.4 si può vedere il risultato di questo passaggio.

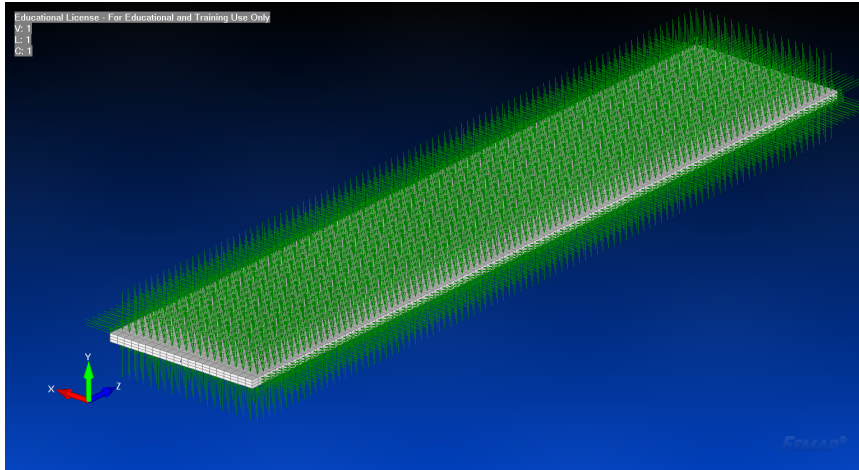


Figura 4.4: Risultato del processo di importazione dei carichi su Nastran

Si è quindi provveduto ad effettuare un'analisi strutturale statica, di cui se ne riporta la deformata in figura 4.5.

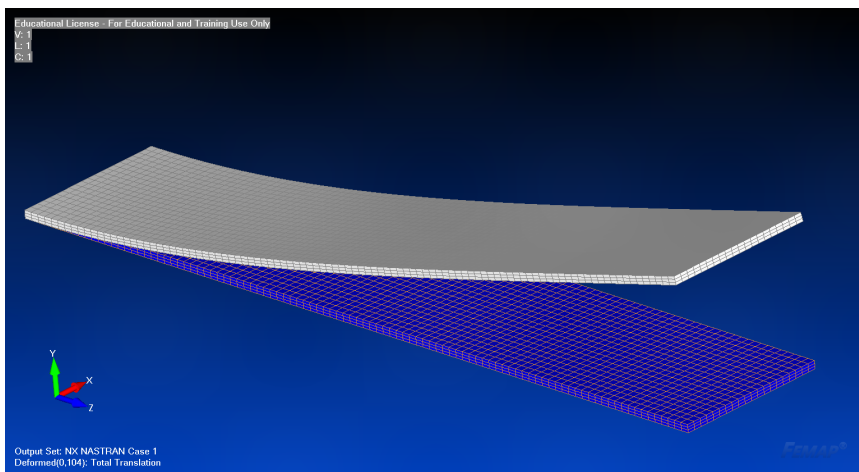


Figura 4.5: Deformazione della piastra nel primo step dell'analisi Two-ways

Una volta completata l'analisi statica, si è andati ad individuare gli spostamenti nel file .pch, fornito come output da Nastran. È stato inoltre esportato un file .bdf del modello completo, in quanto necessario per effettuare l'operazione di morphing. Fatto ciò, si è provveduto a generare una soluzione di RBF Morph (che si ricorda essere integrato in Fluent) tramite il seguente comando:

```
(process-nastran "files name" '(nastran property) scale-disp-factor  
ampli-factor sub-sampling)
```

dove con *sol-name* si va ad indicare il nome dei files .bdf e .pch (che deve essere lo stesso per ambo i files), con *nastran property* il numero della property corrispondente alla mesh di superficie (composta da elementi shell), con *scale-disp-factor* si specifica il fattore di amplificazione degli spostamenti (lasciato pari ad 1 nelle analisi eseguite), con *ampli-factor* viene indicato il fattore di amplificazione della soluzione (anch'esso lasciato pari ad 1) e con *sub-sampling* si indica la densità con cui vengono presi i punti di campionamento (tale fattore è stato preso pari a 0.01 in tutte le analisi svolte). Con questo comando si vanno a generare i files .rbf e .sol, ovvero i files inerenti alla soluzione calcolata da RBF Morph.

Prima di eseguire il morphing, si è dovuto impostare il dominio di azione di RBF Morph. È stata scelta una forma parallelepipedica. Le dimensioni sono state opportunamente scelte per evitare di incorrere nella generazione di volumi negativi nel corso dell'analisi svolta con il metodo di sovrapposizione modale: difatti, in entrambe le tipologie di analisi si è fatto uso dello stesso setup RBF. Tale dominio si può vedere in figura 4.6.

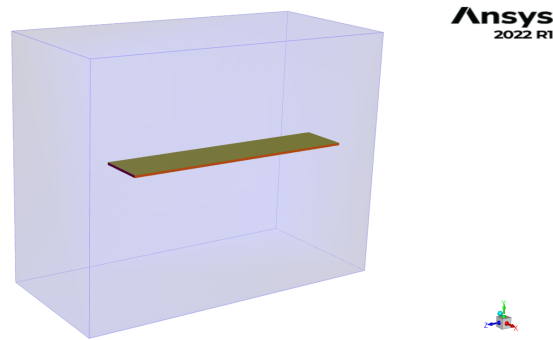


Figura 4.6: Dominio di azione di RBF Morph

È stata realizzata una soluzione RBF contenente solamente questo dominio per velocizzare le analisi svolte, ed è stata utilizzata sia per le analisi Two-Ways che per le analisi di sovrapposizione modale.

Quindi, sono stati selezionati i bordi posteriori della piastra e ad essi è stato imposto uno spostamento nullo. Per escludere tali punti dal calcolo RBF è stato definito intorno ad essi un encap cilindrico, visibile in figura 4.7.

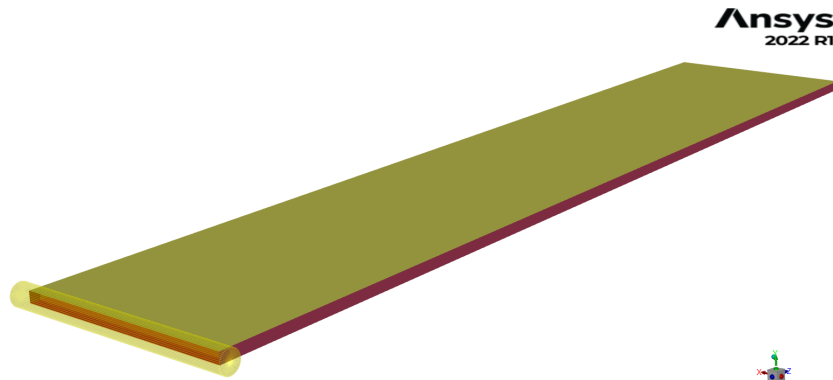


Figura 4.7: Encap volto ad escludere i punti dell'incastro dal calcolo

Terminato il setup lato RBF, si è provveduto ad importare le deformazioni ottenute tramite il calcolo FEM. Posizionando nella cartella di lavoro i file .pch e .bdf, opportunamente rinominati mettendo lo stesso nome ad entrambi,

è stato utilizzato l'opportuno comando per importare tali spostamenti, che si ricorda essere:

```
(process-nastran "files name" '(nastran property) scale-disp-factor  
ampli-factor sub-sampling)
```

In figura 4.8 si possono vedere i punti sorgente ottenuti da quest'operazione, mentre in figura 4.9 si può vedere l'anteprima dello spostamento di tali punti.

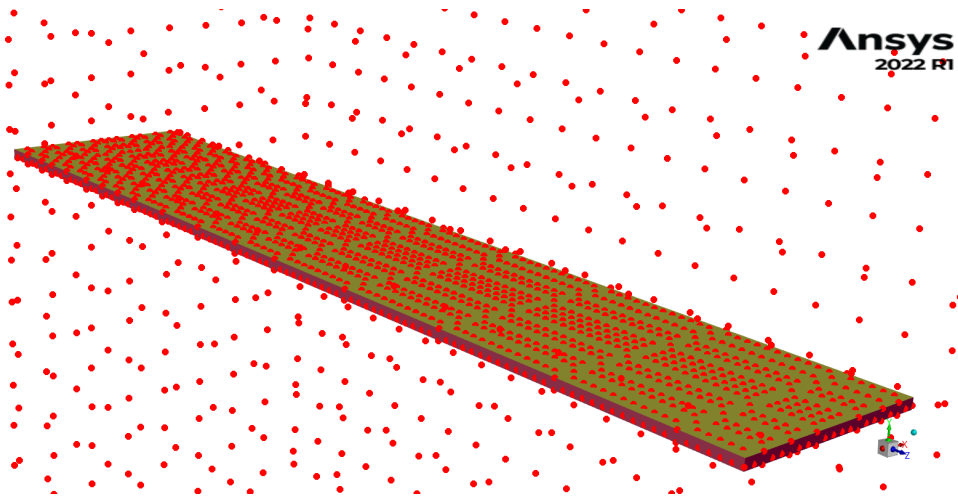


Figura 4.8: Punti sorgente della piastra

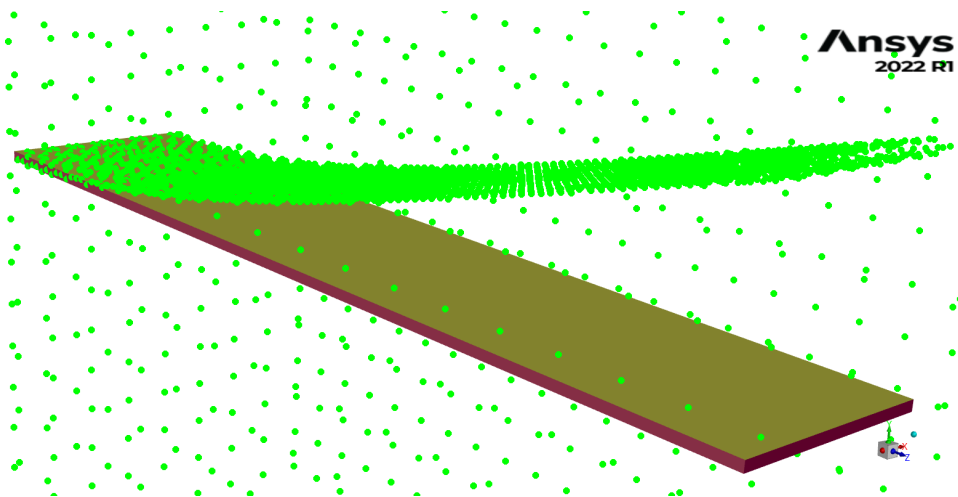


Figura 4.9: Anteprima dello spostamento dei punti sorgente della piastra

Dopo aver importato gli spostamenti, è stata eseguita l'operazione di morphing, il cui risultato è riportato in figura 4.10.

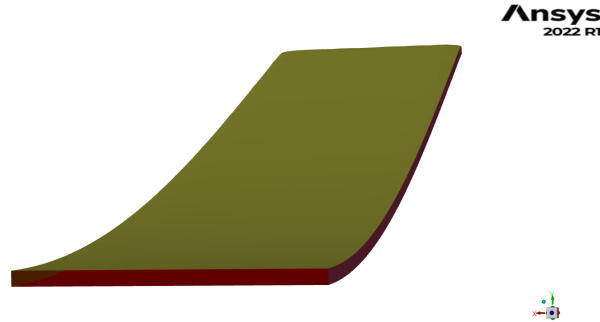


Figura 4.10: Risultato dell'operazione di morphing sulla piastra

Si è quindi passati al calcolo CFD. Una volta arrivati alla convergenza, sono state nuovamente esportate le pressioni su Nastran, ripetendo quindi le operazioni eseguite finora, in accordo con il workflow illustrato in figura 2.2. Ci si è arrestati alla quarta iterazione in quanto si è arrivati alla convergenza degli spostamenti, come si può vedere in figura 4.11.

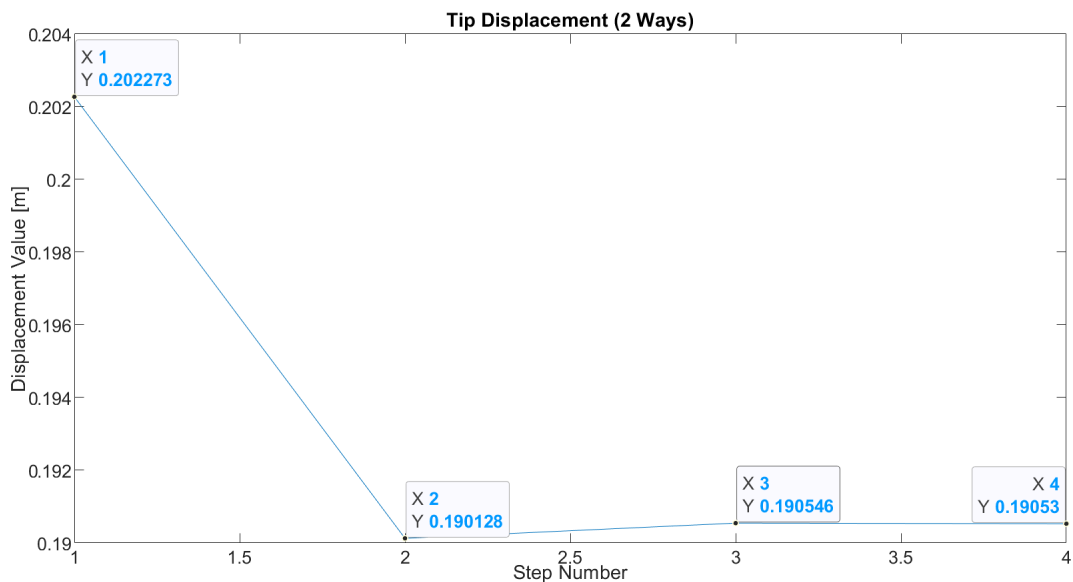


Figura 4.11: Spostamenti del tip della piastra per il metodo Two-Ways

Per quanto riguarda i risultati in termini di coefficienti di Lift e Drag, si riportano in tabella 4.1 i valori ottenuti con questa metodologia di analisi e si fa un confronto con i risultati inerenti alla configurazione baseline, con relativa differenza percentuale tra i due.

	Baseline	Two-Ways	$\Delta\%$
$C_D$	0.4169	0.4160	-0.21%
$C_D$	0.0015	0.0029	+93.33%

Tabella 4.1: Confronto in termini di  $C_L$  e  $C_D$  tra la soluzione baseline ed i risultati dell'analisi Two-Ways

Dalla tabella 4.1 si può vedere come il  $C_L$  venga influenzato negativamente, mentre si assiste ad una crescita del  $C_D$ . Ciò è causato dalla variazione dell'angolo di incidenza del fluido sulla piastra, il quale assume un valore più sfavorevole. In particolare, la notevole crescita del  $C_D$  si ha in quanto questa variazione di incidenza che ad una maggior dissipazione energetica sulle pareti laterali della piastra.

È stata infine analizzata la variazione del campo di pressione sulla piastra. Vengono riportate nelle figure che vanno dalla 4.12 alla 4.16 le pressioni riscontrate nella configurazione baseline e nelle iterazioni del metodo Two-Ways. Di queste ultime, non è stata considerata la quinta iterazione in quanto i risultati sono medesimi a quelli della quarta: difatti, come si evince dalla figura 4.11, gli spostamenti della quarta e della quinta iterazione sono i medesimi, e ciò avviene perché i carichi che si hanno in questi due step sono gli stessi.



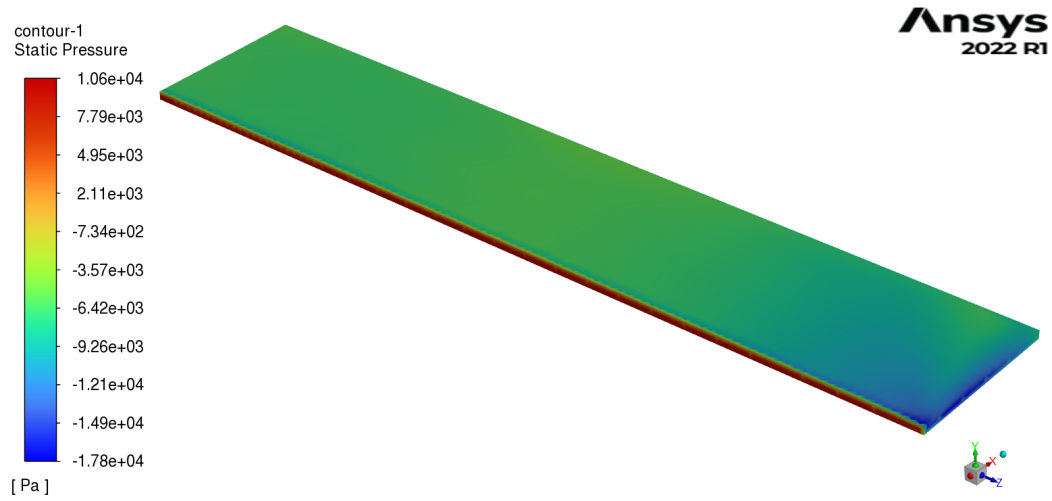


Figura 4.12: Campo di pressione della configurazione baseline

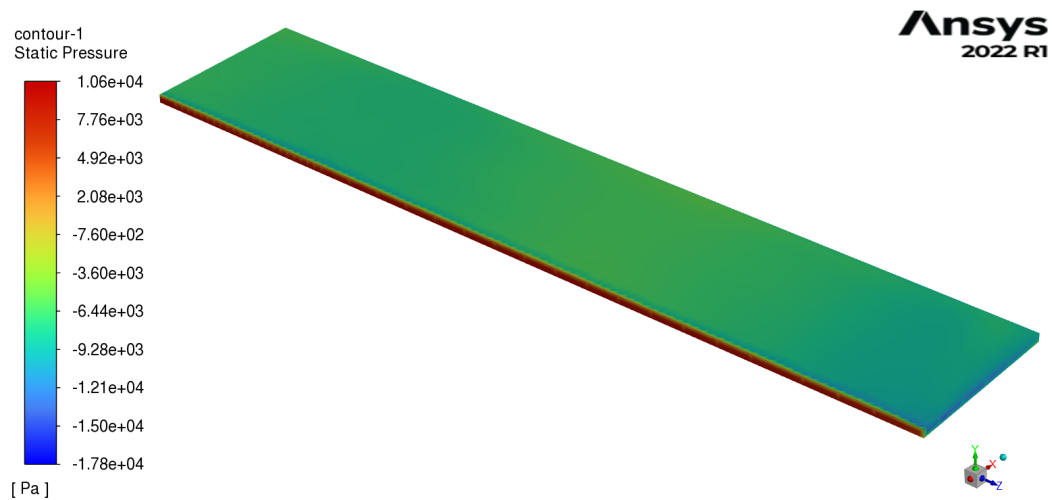


Figura 4.13: Campo di pressione del primo step dell'analisi FSI Two-Ways

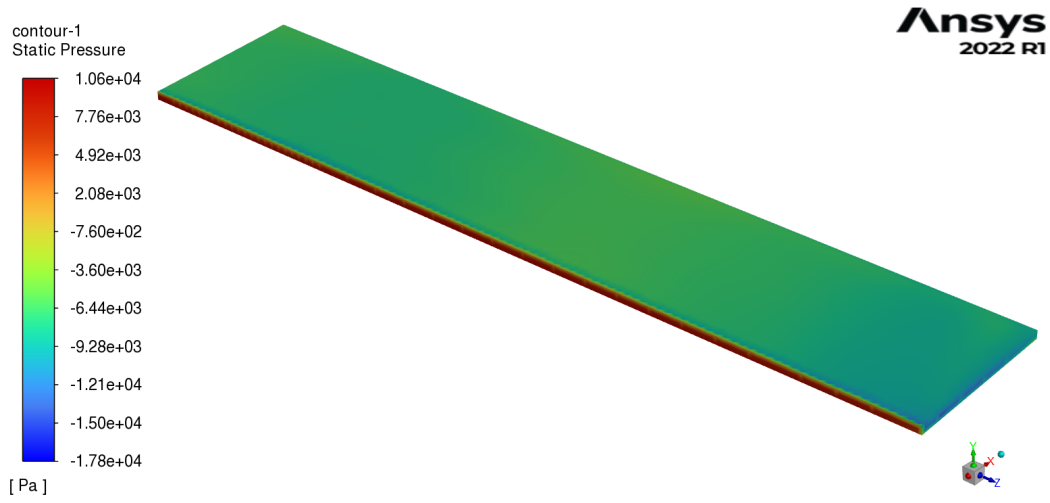


Figura 4.14: Campo di pressione del secondo step dell'analisi FSI Two-Ways

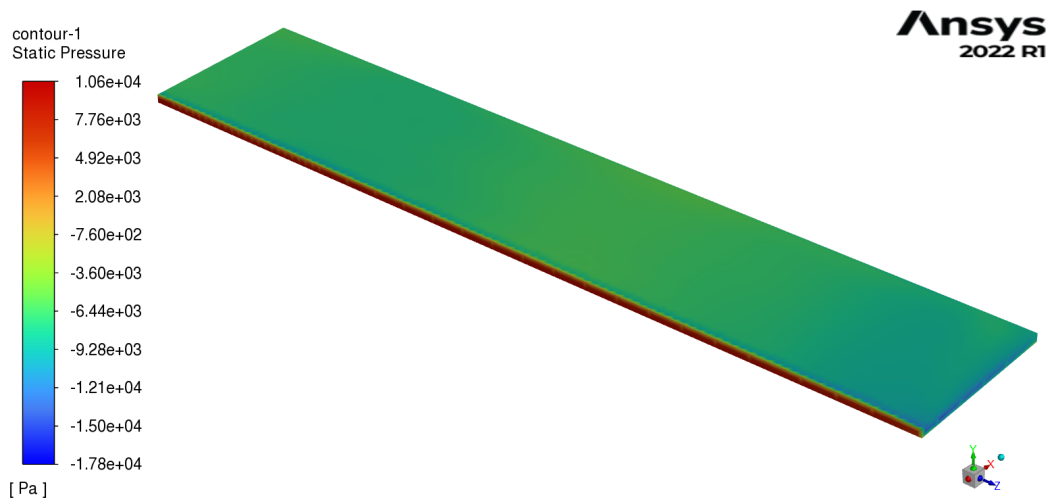


Figura 4.15: Campo di pressione del terzo step dell'analisi FSI Two-Ways

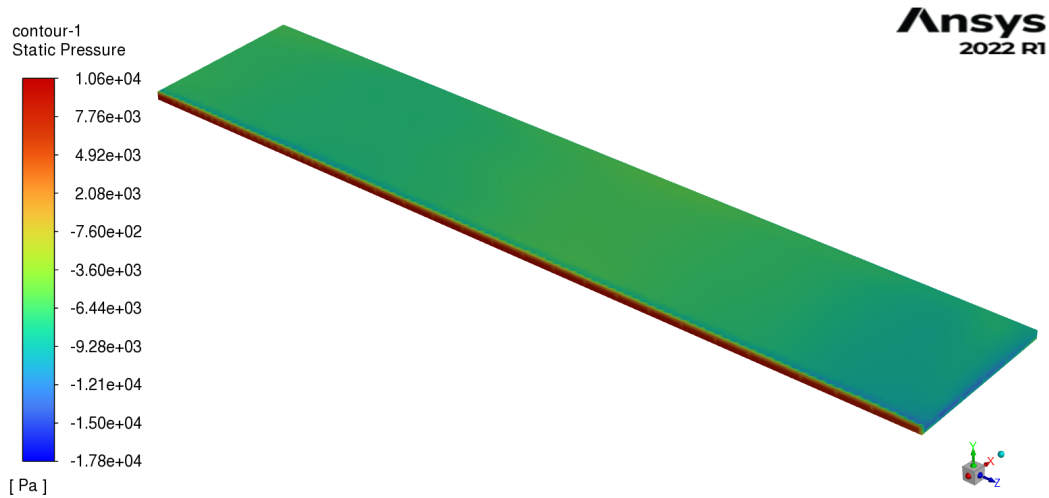


Figura 4.16: Campo di pressione del quarto step dell'analisi FSI Two-Ways

Si può inoltre osservare come il campo di pressione riportato nelle figure 4.13, 4.14, 4.15 e 4.16 sia quasi il medesimo mentre si può apprezzare una variazione considerevole tra il primo step ed il campo della configurazione baseline, riportato in figura 4.12. Difatti, da come si può vedere nel grafico riportato in figura 4.11, il primo step consiste in uno spostamento di 20.23cm rispetto alla configurazione baseline, mentre tra il primo ed il secondo step si apprezza una differenza in termini di spostamento pari ad 1cm e dal secondo step in poi si osservano differenze dell'ordine dei mm. Ciò spiega le sottilissime differenze presenti tra i campi di pressione inerenti ai vari step dell'analisi FSI.

## 4.2.2 Strategia di Sovrapposizione Modale

Anche per questa strategia, come illustrato nel capitolo 2, è stata innanzitutto eseguita un'analisi CFD sulla geometria rigida. Lato Nastran, è stata eseguita un'analisi modale della struttura. Nelle figure 4.17, 4.18, 4.19, 4.20, 4.21, 4.22,

4.23, 4.24, 4.25 e 4.26 vengono riportati i primi dieci modi di vibrare della struttura in esame, disposti in base ad un ordine crescente della frequenza.

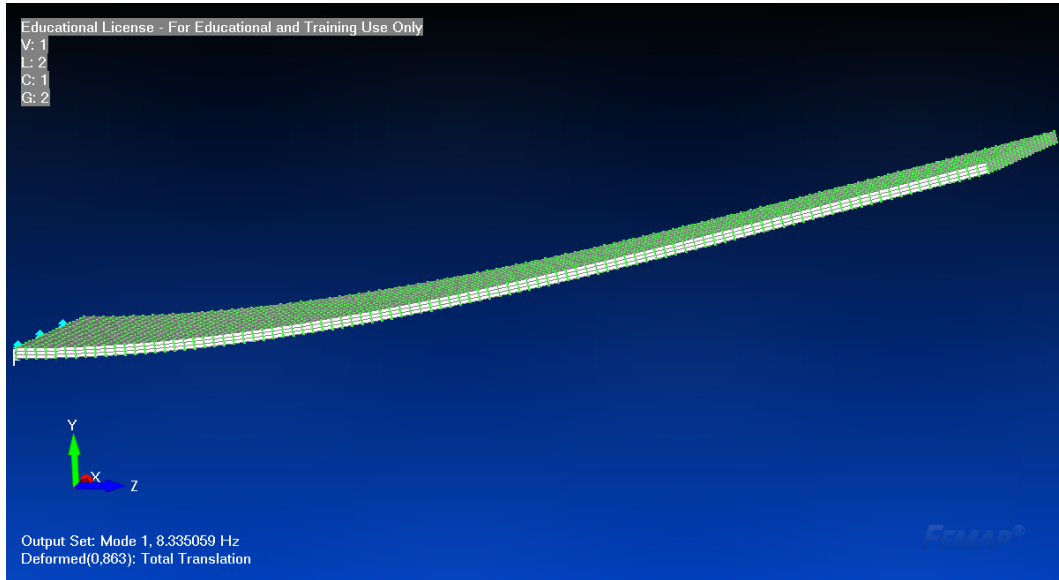


Figura 4.17: Primo modo di vibrare della piastra

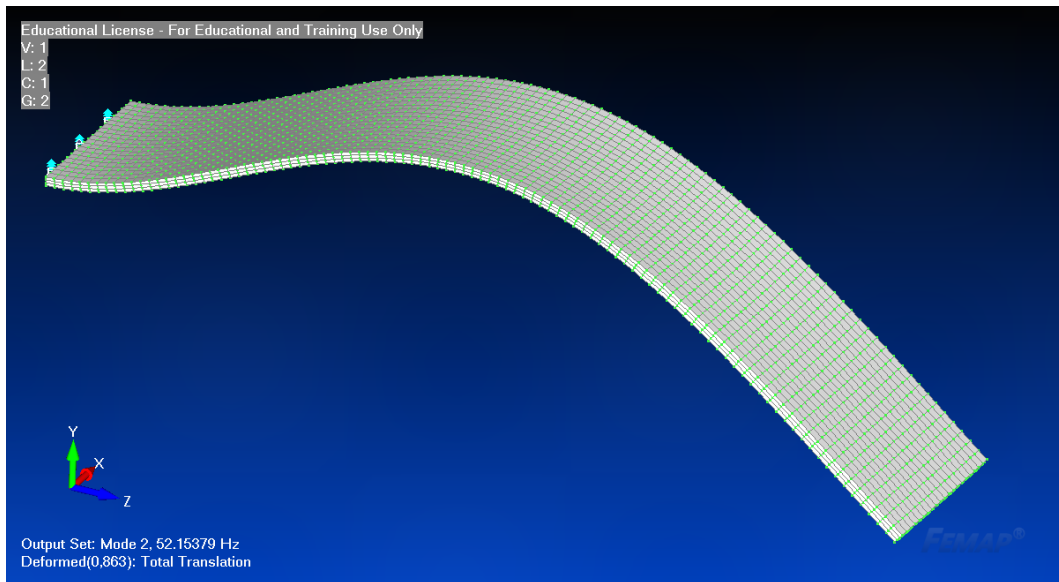


Figura 4.18: Secondo modo di vibrare della piastra

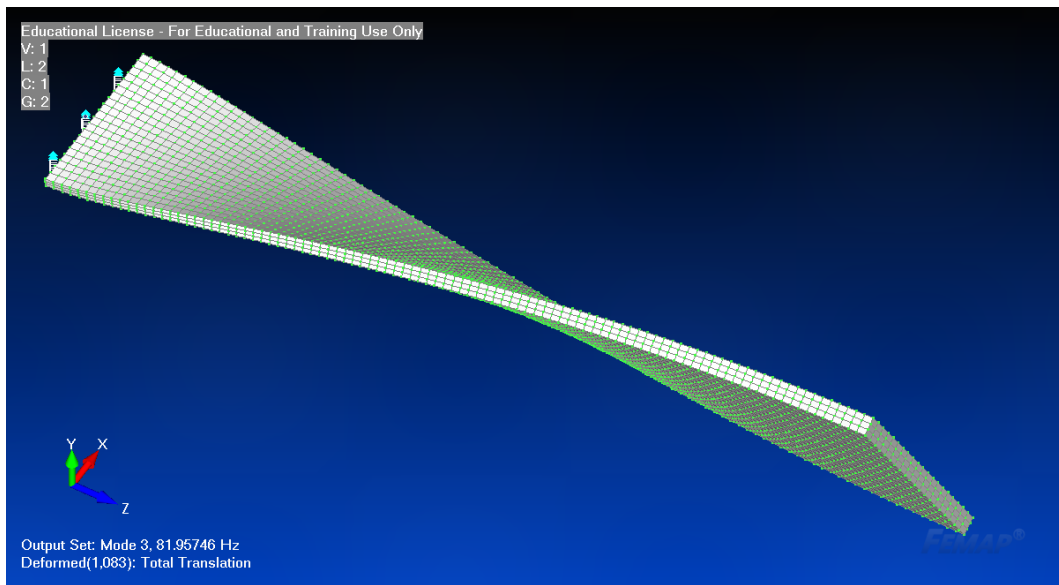


Figura 4.19: Terzo modo di vibrare della piastra

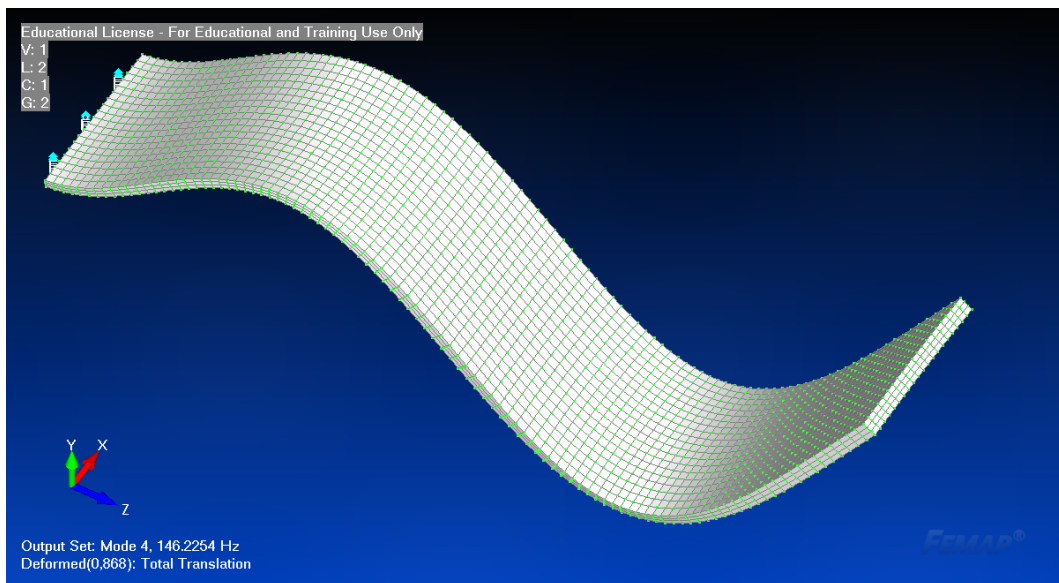


Figura 4.20: Quarto modo di vibrare della piastra

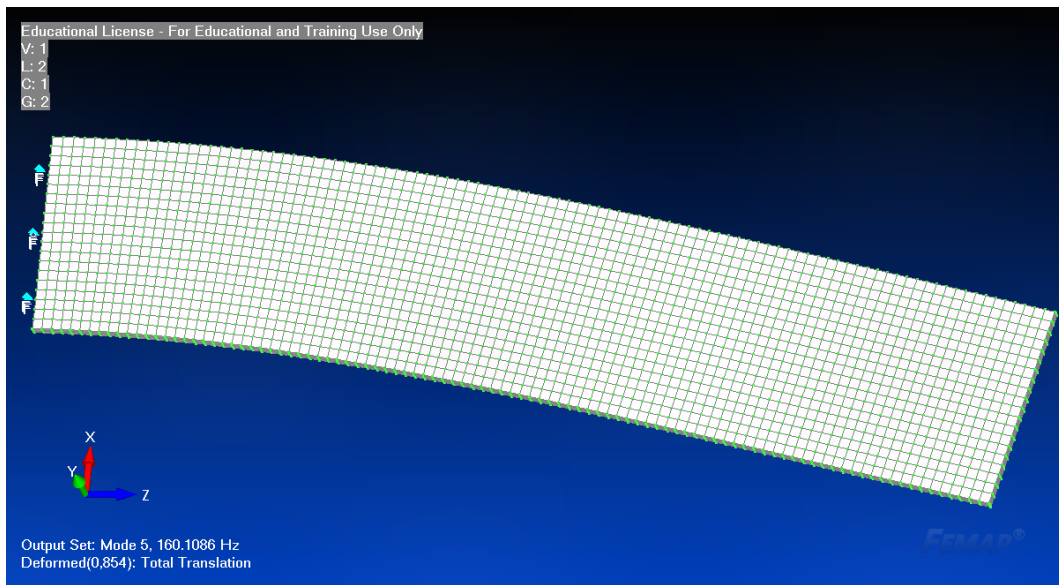


Figura 4.21: Quinto modo di vibrare della piastra

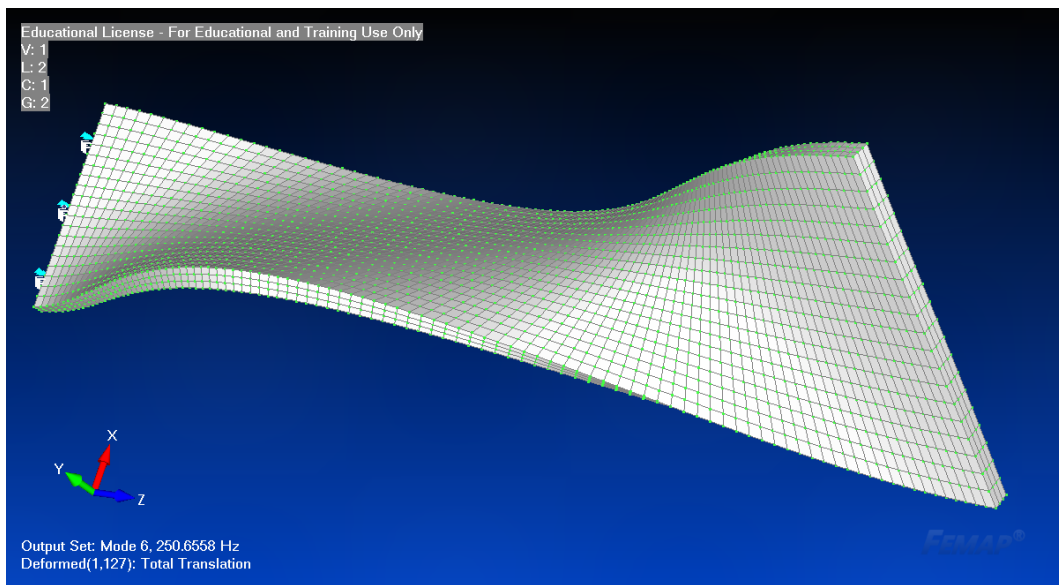


Figura 4.22: Sesto modo di vibrare della piastra

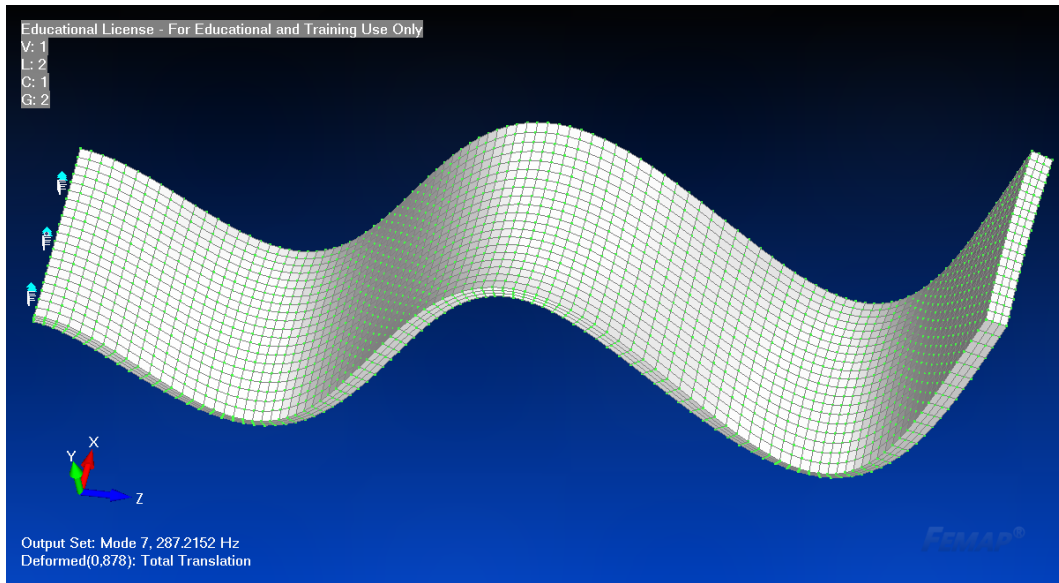


Figura 4.23: Settimo modo di vibrare della piastra

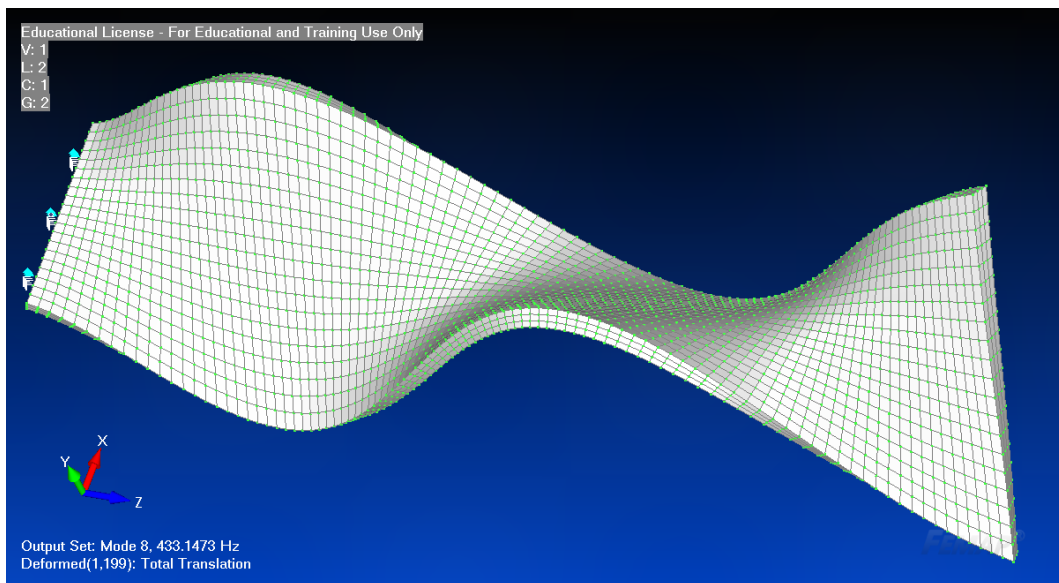


Figura 4.24: Ottavo modo di vibrare della piastra

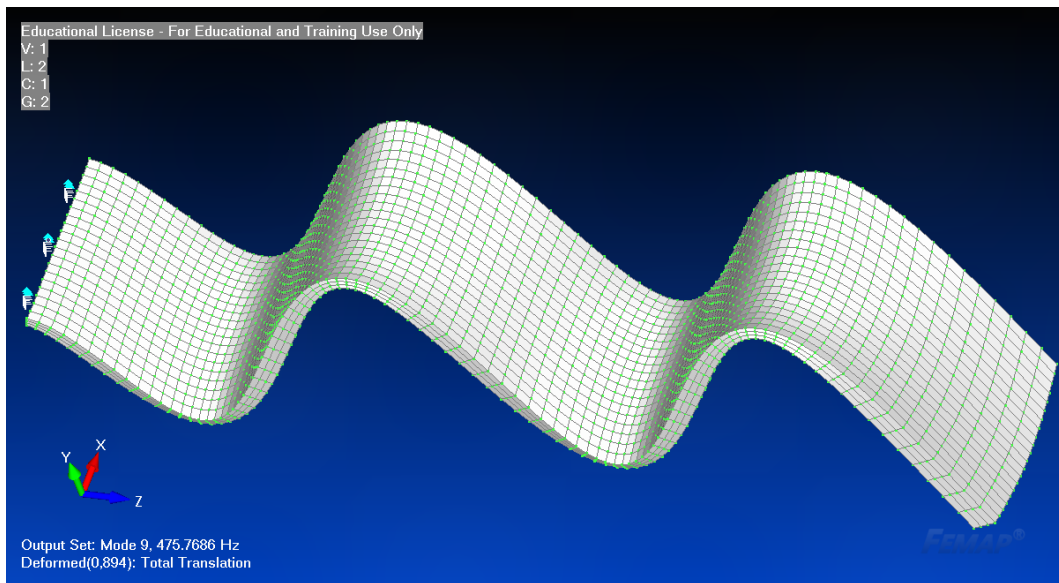


Figura 4.25: Nono modo di vibrare della piastra

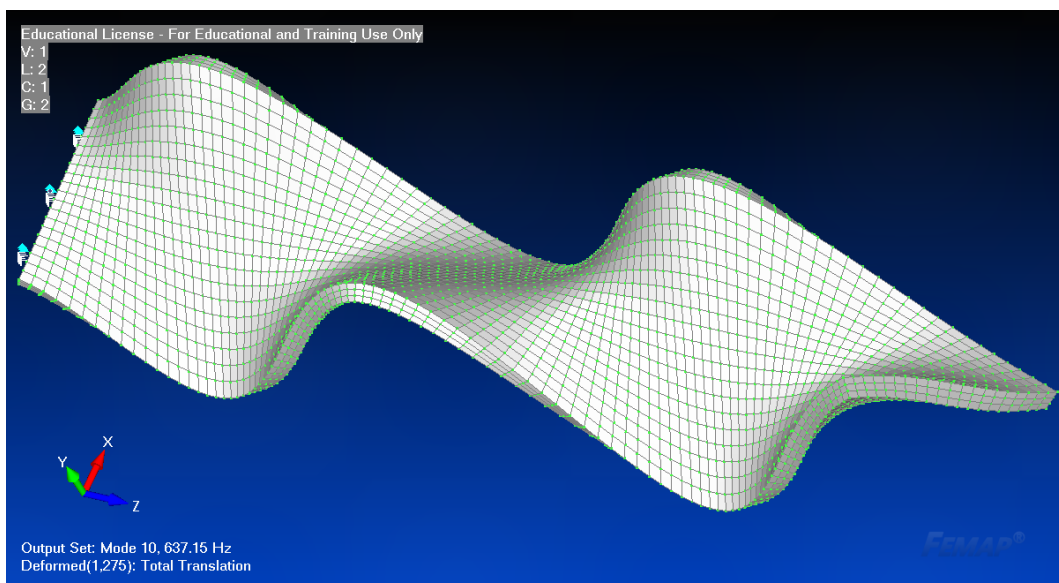


Figura 4.26: Decimo modo di vibrare della piastra

Sono state poi eseguite 10 analisi di sovrapposizione modale, andando ad eliminare man mano l'ultimo modo presente fino ad arrivare ad un'analisi con un



unico modo. In tabella 4.2 vengono riportati gli spostamenti ottenuti al variare del numero di modi considerato, oltre alla differenza percentuale degli spostamenti ottenuti rispetto a quello ottenuto impiegando soltanto il primo modo. Si vuole inoltre sottolineare come questo approccio sia puramente didattico, in quanto lo studio reale prevede di effettuare un'analisi con un elevato numero di modi per poi eseguire un processo di qualificazione della base modale, del quale sarà possibile visionare un esempio applicativo nella sottosezione 5.2.2.

Numero modi	Spostamento al tip [mm]	$\Delta\%$
1 modo	199.19	/
2 modi	196.81	-1.19%
3 modi	199.11	-0.04%
4 modi	199.36	+0.08%
5 modi	199.36	+0.08%
6 modi	199.35	+0.08%
7 modi	199.31	+0.09%
8 modi	199.33	+0.07%
9 modi	199.34	+0.07%
10 modi	199.34	+0.07%

Tabella 4.2: Valore dello spostamento massimo al variare del numero di modi considerati

È facilmente intuibile come sia sufficiente fermarsi al quarto modo, in quanto gli altri non hanno un contributo significativo: consultando la tabella 4.2 si può verificare come l'uso di più di 4 modi non porti a variazioni significative sul risultato. Difatti, le coordinate modali dei modi aventi le frequenze più elevate risulteranno molto più basse rispetto a quelle dei primi 4.

In figura 4.27 si può vedere l'andamento degli spostamenti per quanto riguarda la strategia di sovrapposizione modale.

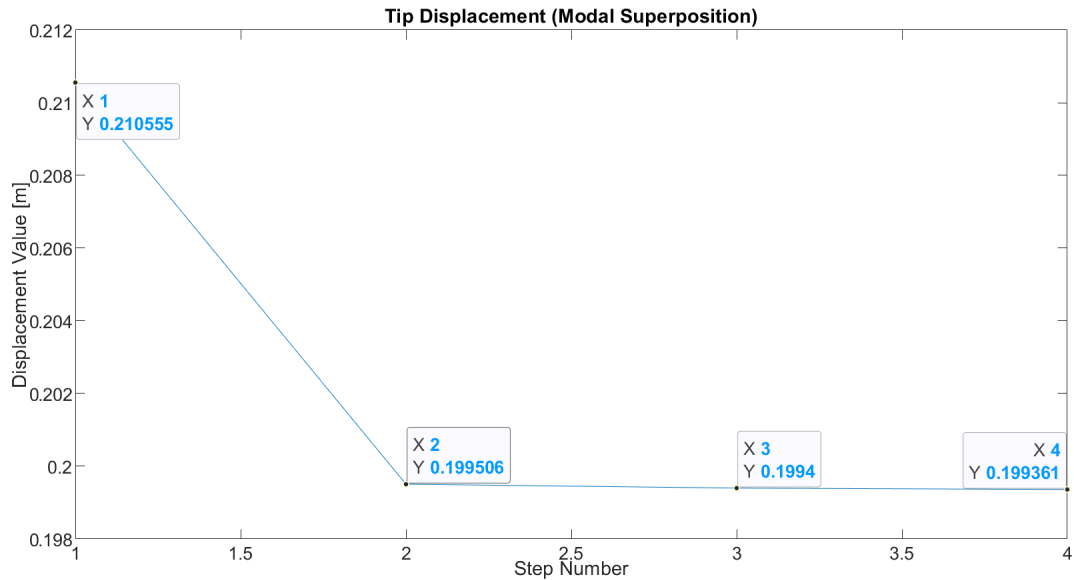


Figura 4.27: Spostamenti del tip della piastra per la sovrapposizione modale

Qui si riporta nuovamente in figura 4.28 il campo di pressione relativo alla configurazione baseline, così da rendere più agevole il confronto con il campo di pressione ottenuto mediante l'analisi svolta secondo la metodologia di sovrapposizione modale, riportato in figura 4.29.

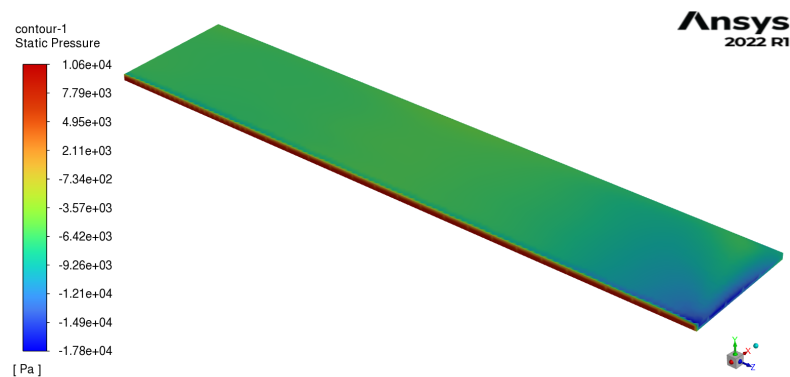


Figura 4.28: Campo di pressione della configurazione baseline

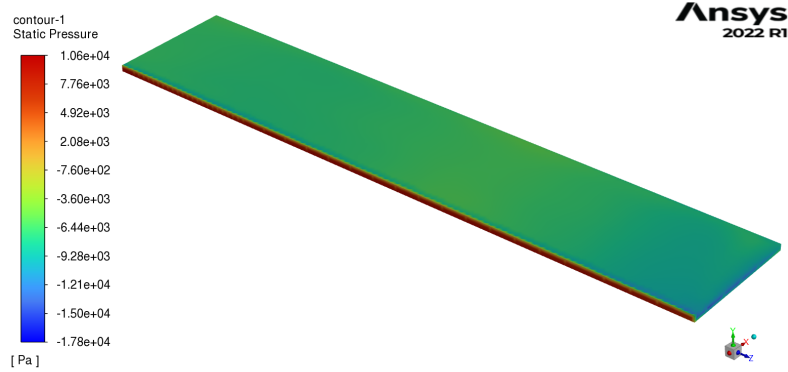


Figura 4.29: Campo di pressione risultante dal metodo di sovrapposizione modale

Nella tabella 4.3 vengono riportati i  $C_L$  e  $C_D$  della configurazione baseline e quelli ottenuti tramite il metodo di sovrapposizione modale.

	Baseline	Modal	$\Delta\%$
$C_L$	0.4169	0.4136	-0.79%
$C_D$	0.0015	0.0026	+73.33%

Tabella 4.3: Confronto in termini di  $C_L$  e  $C_D$  tra la soluzione baseline ed i risultati dell'analisi di sovrapposizione modale

Dalla tabella 4.3 si può vedere come il  $C_L$  rimanga sostanzialmente invariato, a differenza del  $C_D$ , il quale cresce notevolmente. Ciò è dovuto alla variazione dell'angolo di attacco della piastra causato dalla deformazione della stessa.

# Capitolo 5

## HIRENASD

### 5.1 Descrizione del Modello

In questo capitolo si effettuerà la descrizione delle analisi FSI svolte sul modello HIRENASD, ovvero un profilo alare, in termini di setup e risultati. Il case-study in esame è una simulazione di un modello esistente nella realtà (visibile in figura 5.1): si può quindi fare affidamento ai risultati disponibili in letteratura per svolgere un processo di validazione dei risultati delle analisi numeriche.



Figura 5.1: Modello HIRENASD in galleria del vento

Anche per questa applicazione le strategie FSI implementate sono state il processo Two-Ways ed il metodo di sovrapposizione modale.

Si riporta in figura 5.2 il modello FEM di HIRENASD. Si può osservare la presenza di uno shaker alla base dello stesso, il quale è volto a riprodurre i modi propri della struttura facendola vibrare alle frequenze per cui questi hanno luogo. Si rimarca come, oltre al file .bdf contenente i soli elementi della skin, sia stato necessario realizzare anche un file .bdf contenente le informazioni dell'intero modello FEM, con il fine di importare in RBF Morph gli spostamenti trovati tramite l'analisi statica: difatti, si vuole ricordare che per generare le soluzioni RBF sono necessari il suddetto file .bdf ed il file contenente gli spostamenti strutturali, il quale ha estensione .pch.

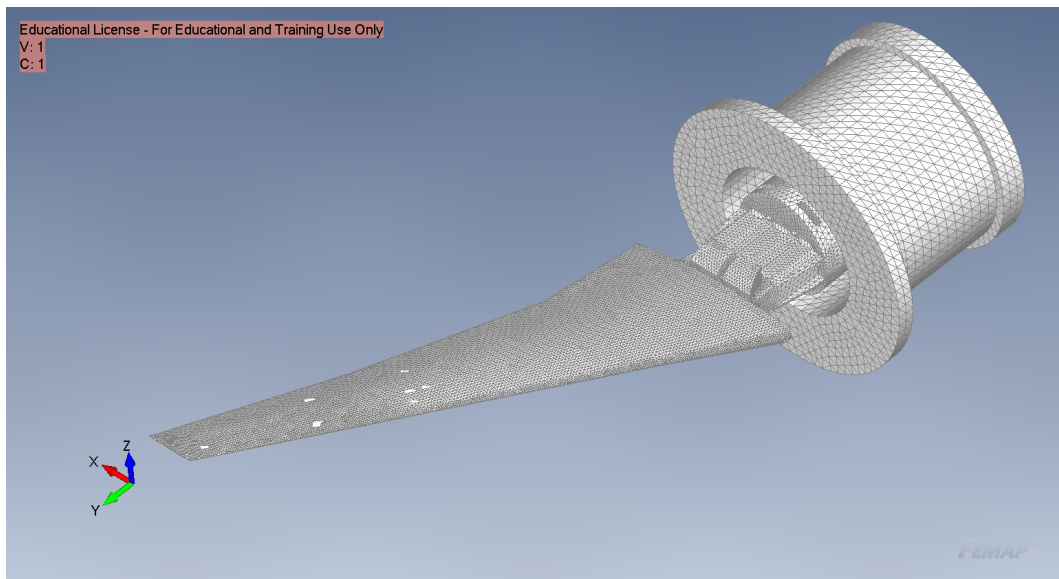


Figura 5.2: Modello FEM di HIRENASD

Il modello CFD ha una mesh composta da 13169981 celle, 32398946 facce e 7206319 nodi; si riporta in figura 5.3 la mesh superficiale del profilo alare.

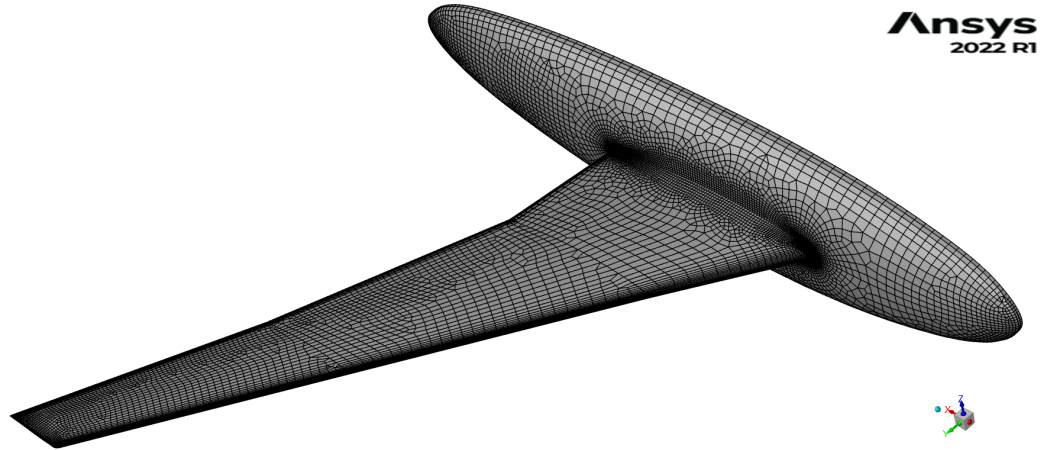


Figura 5.3: Mesh superficiale del modello CFD di HIRENASD

Il setup RBF, come per il caso esposto nel capitolo 4, è lo stesso sia per l'analisi Two-Ways che per il metodo di sovrapposizione modale.

## 5.2 Simulazioni e Risultati

Nella presente sezione verranno descritte le analisi FSI effettuate e saranno esposti i risultati ottenuti.

### 5.2.1 Strategia Two-Ways

Il workflow seguito per la metodologia Two-Ways è sempre quello illustrato nella figura 2.2, visibile nel capitolo 2.

Per quanto riguarda il setup RBF, è stato innanzitutto creato il dominio di azione del morpher, il quale è visibile in figura 5.4, optando per una forma parallelepipedica.

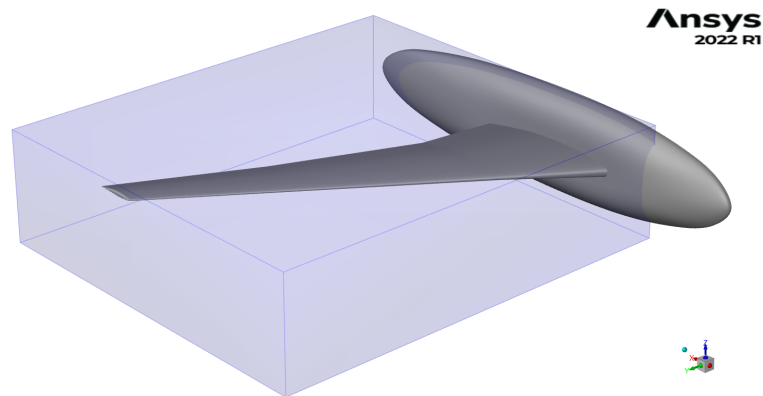


Figura 5.4: Dominio di azione di RBF Morph su HIRENASD

Si è poi prescritto che la fusoliera rimanesse immobile; per far ciò, è stato imposto ad essa uno spostamento nullo tramite il modulo SetM, il quale è riportato in figura 3.6. Quindi, tramite il pannello visibile in figura 3.7 è stato realizzato un encap nella zona di connessione tra la fusoliera ed il profilo alare con lo scopo di escludere dal calcolo RBF i punti presenti in questa zona. Tale approccio è stato seguito in quanto nel modello in galleria del vento, così come nel modello FEM, la radice dell'ala è collegata ad uno shaker che la rende libera di muoversi con un moto relativo rispetto alla fusoliera. In figura 5.5 si può vedere il suddetto encap.

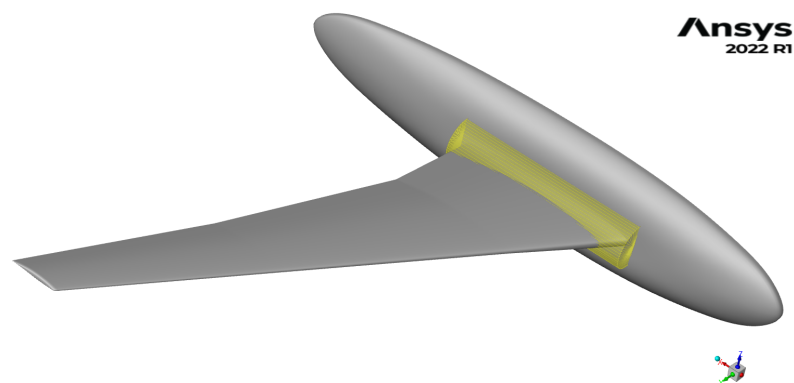


Figura 5.5: Encap tra fusoliera e profilo alare

Partendo da una soluzione CFD convergente, si è provveduto ad esportare i campi di pressione da Fluent a Nastran per poi eseguire un'analisi statica. In figura 5.6 si può vedere il risultato dell'importazione dei carichi su Nastran.

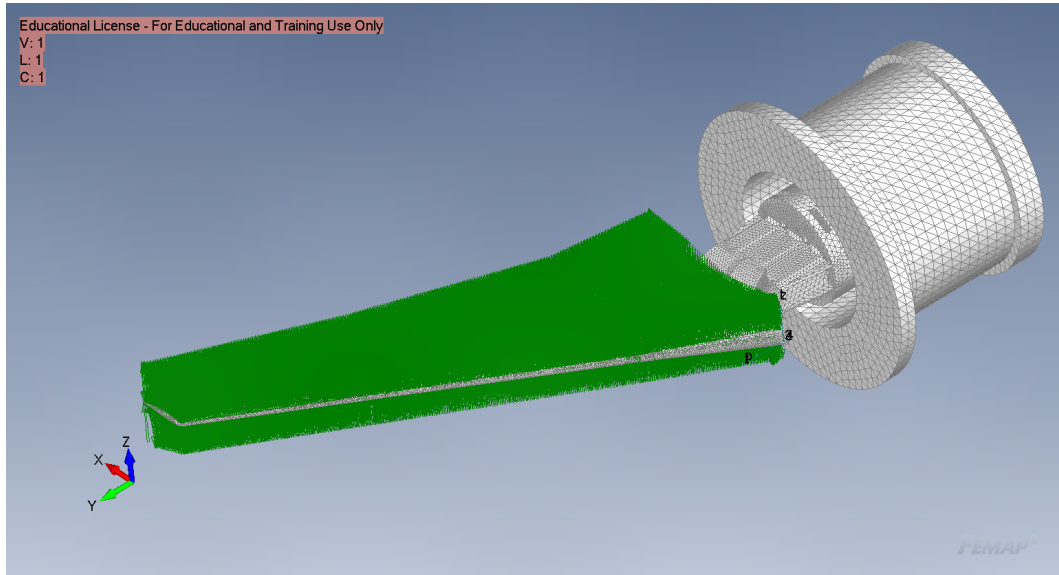


Figura 5.6: Risultato dell'importazione dei carichi su Nastran

Una volta che questa procedura è giunta al termine, sono stati esportati gli spostamenti da Nastran a Fluent tramite RBF Morph. Come per il caso della piastra, illustrato nel capitolo 4, per svolgere quest'operazione è stato utilizzato l'apposito comando:

```
(process-nastran "files name" '(nastran property) scale-disp-factor  
ampli-factor sub-sampling)
```

Il significato dei vari termini apparenti in esso è stato già illustrato nella sottosezione 4.2.1. Una volta importato il campo di spostamento, è stata effettuata l'operazione di morphing ed è quindi stata lanciata una nuova simulazione CFD. Quando questa è giunta a termine, sono stati ripetuti i passaggi qui effettuati in accordo a quanto esposto nel workflow riportato in figura 2.2.



I risultati ottenuti in termini di spostamenti sono riportati in figura 5.7. Si può apprezzare come l'analisi FSI sia giunta a termine in 4 iterazioni.

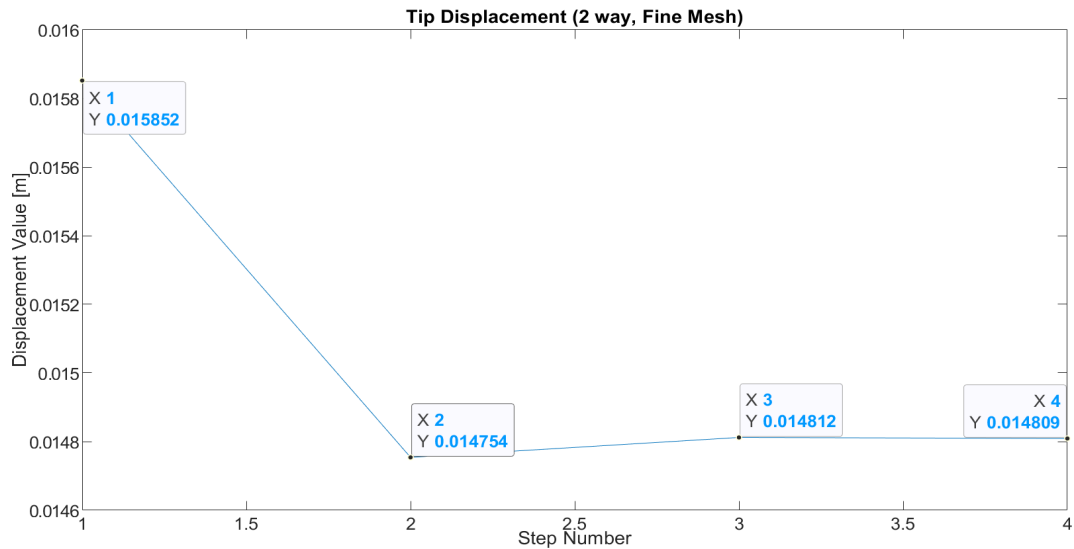


Figura 5.7: Spostamenti del tip di HIRENASD per il metodo Two-Ways

Per quanto riguarda i contour della pressione, in figura 5.8 viene riportato quello relativo alla configurazione baseline ed in figura 5.9 quello relativo all'ultima iterazione.

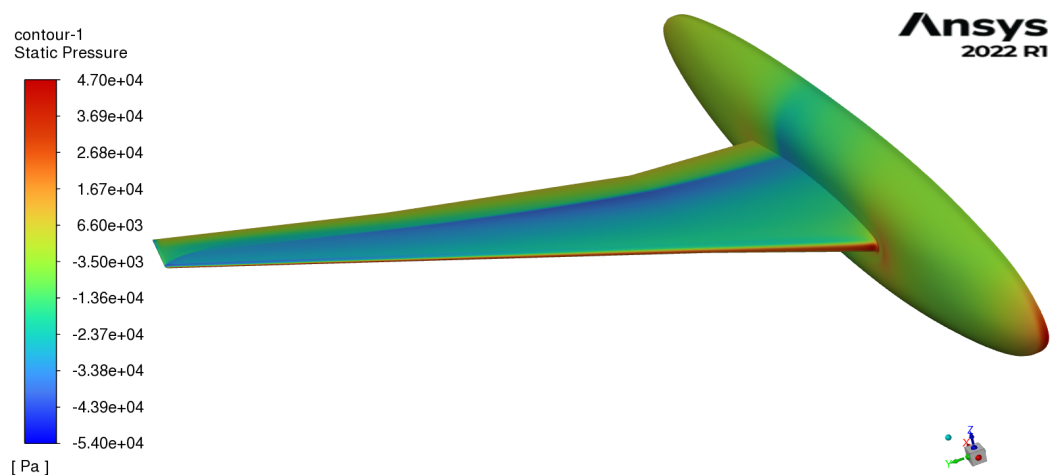


Figura 5.8: Contour della pressione relativo alla configurazione baseline

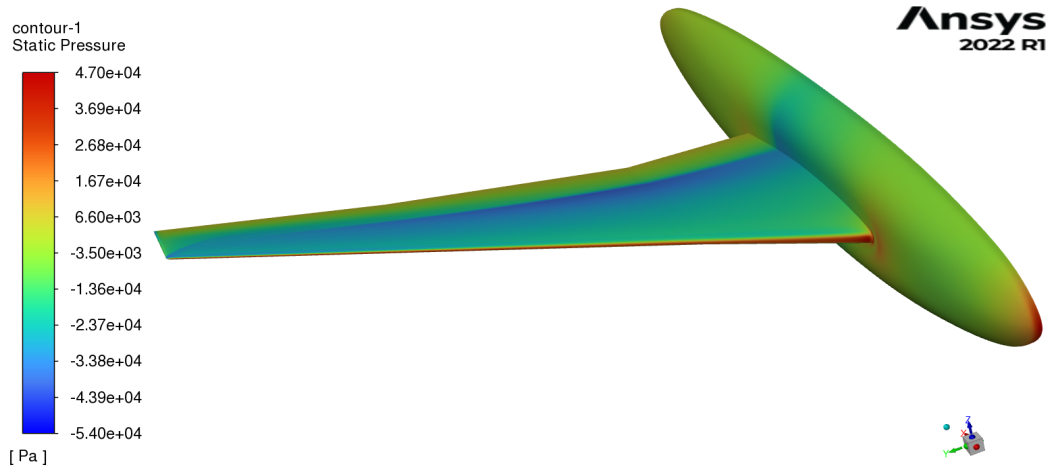


Figura 5.9: Contour della pressione risultante dall'analisi FSI Two-Ways

Dal confronto delle figure 5.8 e 5.9, si può verificare come il campo di pressione presenti una leggera differenza nei pressi del tip dell'ala.

Per quanto riguarda i coefficienti di Lift e Drag, vengono riportati in tabella 5.1 quelli relativi alla configurazione baseline e quelli risultanti dall'analisi FSI Two-Ways.

	Baseline	Two-Ways	$\Delta\%$
$C_L$	0.3568	0.3395	-4.85%
$C_D$	0.0137	0.0144	+5.11%

Tabella 5.1: Confronto in termini di  $C_L$  e  $C_D$  tra la soluzione baseline ed i risultati dell'analisi FSI Two-Ways

Si osserva un decremento del  $C_L$  ed un aumento del  $C_D$ : ciò è dovuto ad una variazione dell'angolo di attacco dell'ala a causa della deformazione della stessa, portando quindi ad un peggioramento delle performance.

### 5.2.2 Strategia di Sovrapposizione Modale

In questo caso si è provveduto innanzitutto ad effettuare un'analisi modale tramite Nastran. Nelle figure 5.10, 5.11, 5.12, 5.13, 5.14 e 5.15 vengono riportati i primi 6 modi di vibrare della struttura, disposti secondo un ordine crescente della frequenza.

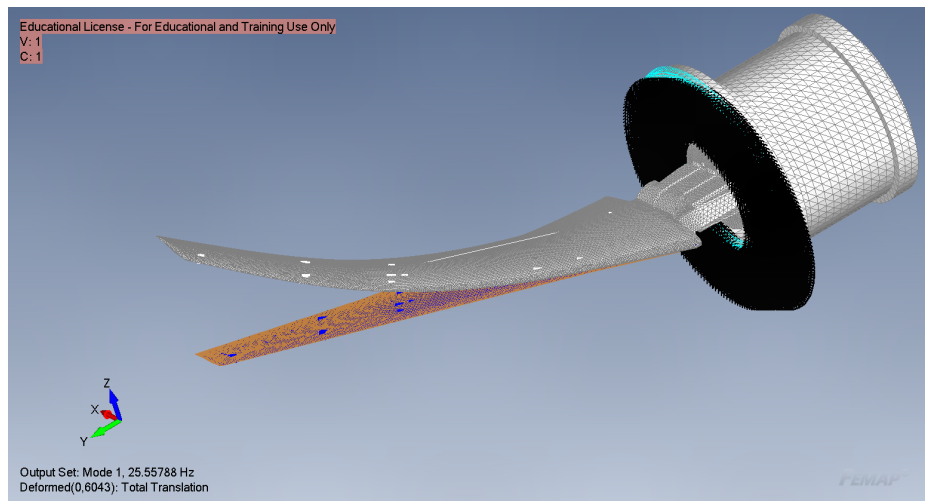


Figura 5.10: Primo modo di vibrare di HIRENASD

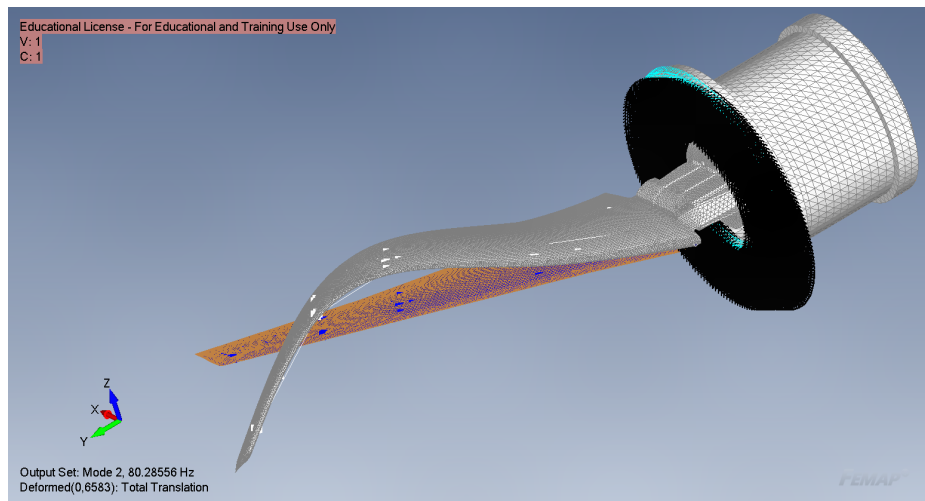


Figura 5.11: Secondo modo di vibrare di HIRENASD

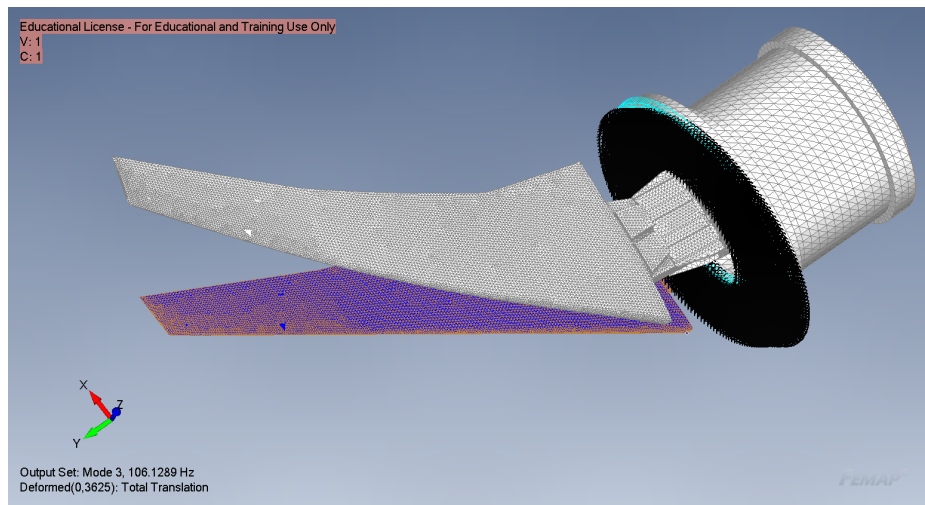


Figura 5.12: Terzo modo di vibrare di HIRENASD

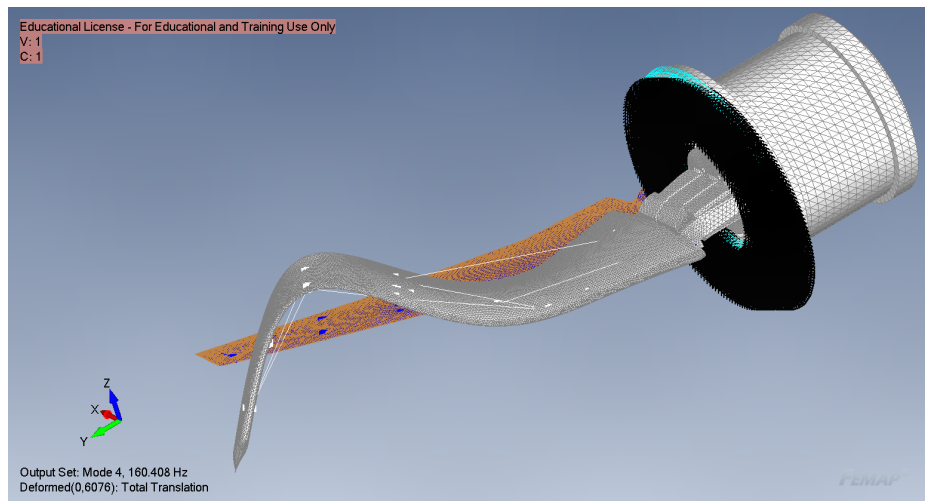


Figura 5.13: Quarto modo di vibrare di HIRENASD

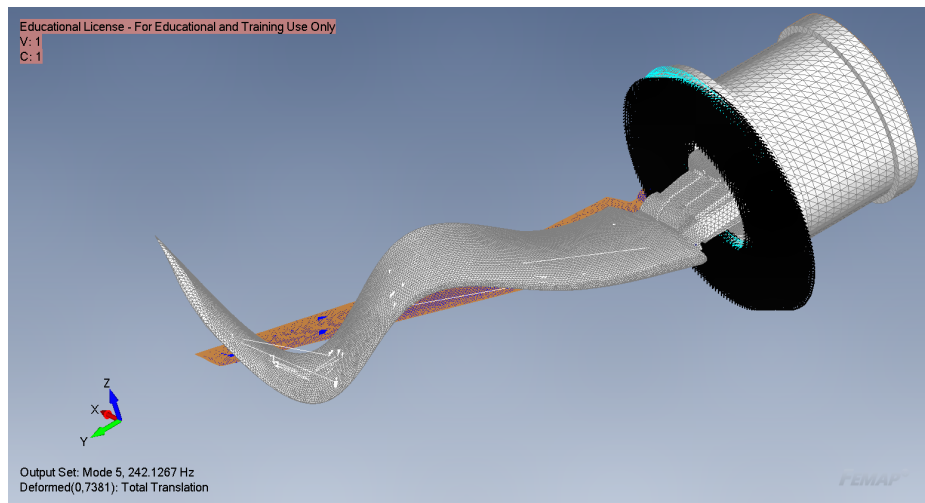


Figura 5.14: Quinto modo di vibrare di HIRENASD

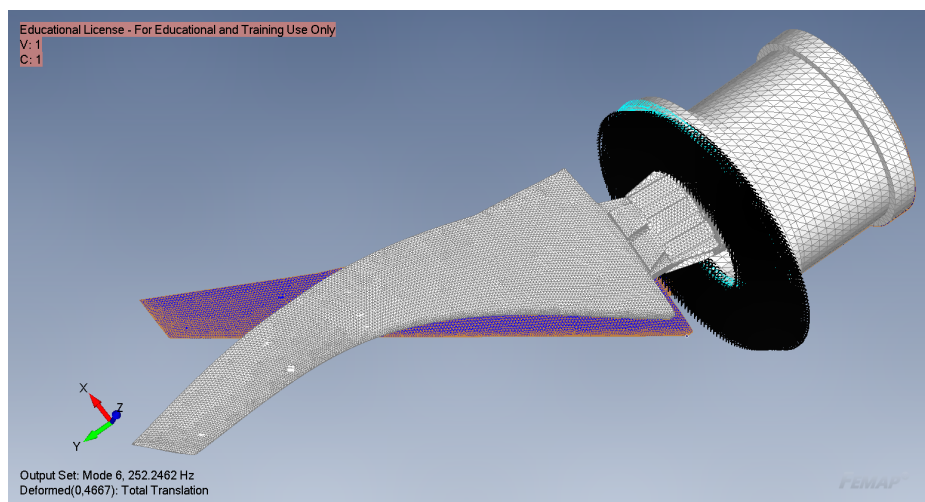


Figura 5.15: Sesto modo di vibrare di HIRENASD

Una volta terminata l'analisi modale, si è provveduto a generare 6 files .pch, uno per ogni modo. Quindi, si è effettuata l'importazione di tali modi su Fluent mediante RBF Morph utilizzando il comando:

*(process-nastran "mode number" '(nastran property) scale-disp-factor  
ampli-factor sub-sampling)*

È stata generata una soluzione RBF per ogni modo. Il setup del dominio RBF (riportato in figura 5.16) è lo stesso dell'analisi Two-Ways.

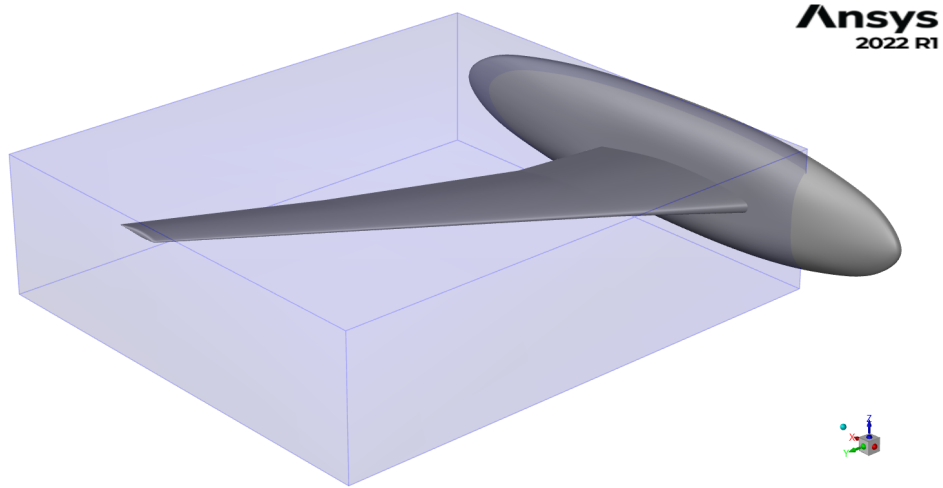


Figura 5.16: Dominio RBF per l'analisi con sovrapposizione modale nel caso HIRENASD

Una volta completata la generazione delle soluzioni RBF per le varie forme modali, si è passati al setup dell'analisi di sovrapposizione modale. Essendo questo un processo iterativo, è stato opportuno definire l'intervallo di iterazioni per cui fosse previsto l'aggiornamento dei fattori di amplificazione delle forme modali. Tale procedura è stata effettuata definendo una *calculation activity*, in cui è stato imposto il comando:

*(modal-q-update-static)*

seguito dal numero di iterazioni di aggiornamento desiderate.

Il vantaggio di questa procedura consiste nell'intrinseca automazione realizzabile: difatti, non è previsto un continuo interfacciamento tra i due solver,

pertanto è sufficiente un journal file per far eseguire a Fluent tutta la procedura in automatico.

In tabella 5.2 si riportano gli spostamenti ottenuti al variare del numero di modi considerati e la differenza percentuale rispetto allo spostamento ottenuto con un singolo modo. Si può verificare come gli spostamenti convergano con l'utilizzo di 4 modi.

Numero modi	Spostamenti [mm]	$\Delta\%$
1 modo	15.94	/
2 modi	14.79	-7.21%
3 modi	14.81	-7.09%
4 modi	14.89	-6.59%
5 modi	14.88	-6.65%
6 modi	14.88	-6.65%

Tabella 5.2: Confronto in termini di spostamenti ottenuti al variare del numero di modi considerati

Quanto riportato in tabella 6.4 riguardo l'influenza dei modi di vibrare si può verificare tramite la qualificazione della base modale. Questo processo consiste nel sovrapporre le forme modali, opportunamente amplificate mediante la loro coordinata modale, con la soluzione statica inerente al primo step dell'analisi Two-Ways tramite il pannello multi-sol, riportato in figura 3.11, eseguendo un'operazione di preview. Si va quindi ad annullare la coordinata dell'ultima forma modale (in questo caso la sesta) e si controlla la presenza di cambiamenti rilevanti sulla preview. Qualora non si assista a ciò, si può asserire come il modo annullato non abbia influenza sulla deformazione strutturale. Si procede quindi annullando man mano l'ultimo modo per la singola iterazione, fin quando non rimane la sovrapposizione del primo modo con la soluzione stati-

ca. Quando una forma modale risulta rilevante, la sovrapposizione delle forme modali ad essa precedenti con la soluzione statica restituirà una deformata ad essa somigliante. Tale risultato rappresenta l'errore di approssimazione. In figura 5.17 si riporta l'errore di approssimazione ottenuto considerando il solo primo modo: dal confronto con la figura 5.11 si può verificare come questo risultato sia simile al secondo modo di vibrare. Nell'immagine 5.18 si può vedere come l'errore ottenuto considerando i soli primi due modi sia simile alla quarta forma modale, riportata in figura 5.13, e la stessa cosa si osserva in figura 5.19, in cui si riporta l'errore ottenuto considerando i primi tre modi. La coincidenza di questi due errori si ha in quanto il terzo modo ha una scarsa partecipazione al campo deformativo: difatti, da come si può vedere in figura 5.12, si ha una flessione nel piano ortogonale del profilo alare. Dato che il grado di libertà ad esso correlato non viene attivato, il terzo modo avrà un'influenza trascurabile sul campo deformativo. Infine, si può vedere come le mappe di errore riportate in figura 5.20, 5.21 e 5.22, le quali competono rispettivamente ai primi 3, primi 4 e primi 5 modi, siano coincidenti: in base a ciò, si può asserire come la convergenza degli spostamenti si abbia dal quarto modo in poi, confermando i risultati riportati in tabella 6.4. Nel caso in esame, dato il basso valore degli errori, è stato utilizzato un coefficiente di amplificazione pari a 500 per poterli visualizzare.

Si vuole sottolineare come la qualificazione della base modale sia una procedura implementabile prima del lancio dell'analisi FSI calcolando le coordinate modali a partire dalla soluzione CFD baseline, come mostrato nell'equazione 2.2: in tal maniera, si può lanciare un'analisi di sovrapposizione modale che sarà sicuramente convergente in termini di spostamenti. Per approfondimenti in merito a questa procedura si rimanda a [15].



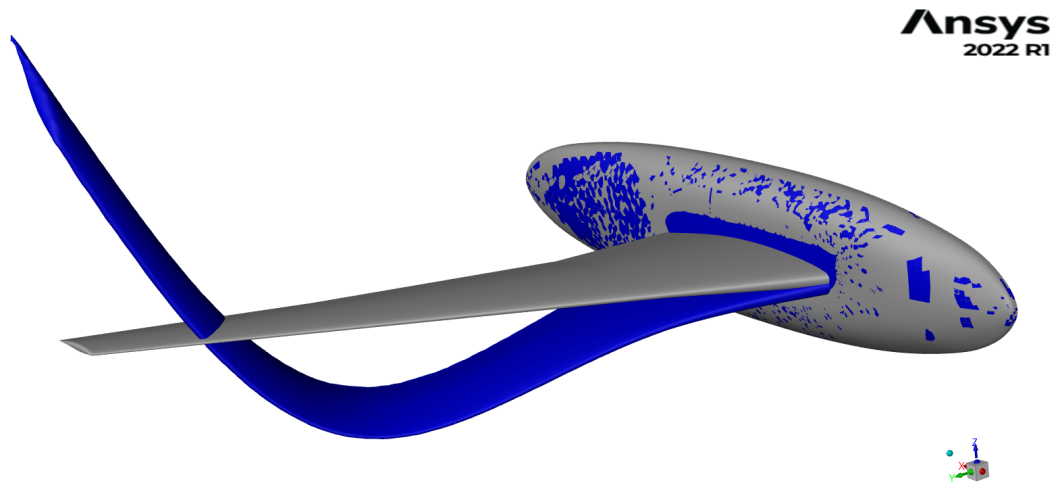


Figura 5.17: Mappa dell'errore considerando il primo modo

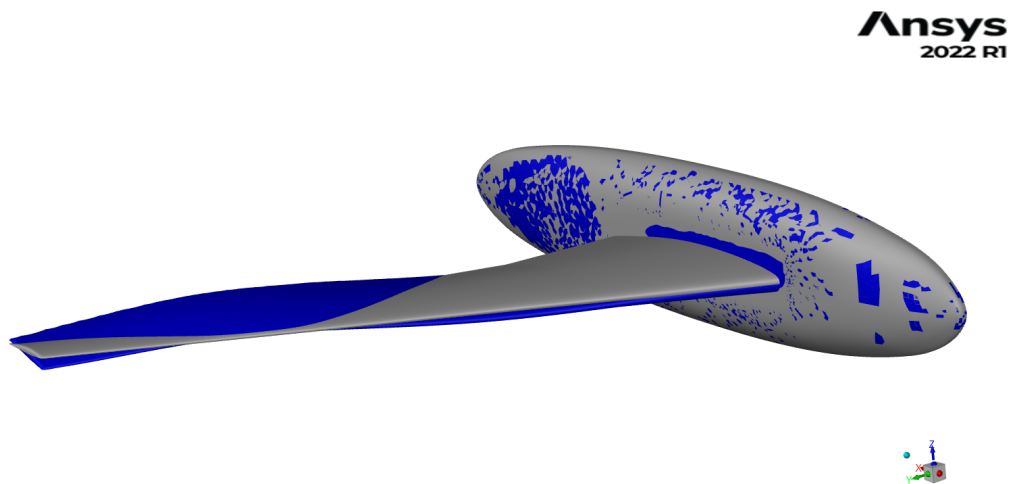


Figura 5.18: Mappa dell'errore considerando i primi due modi

**Ansys**  
2022 R1

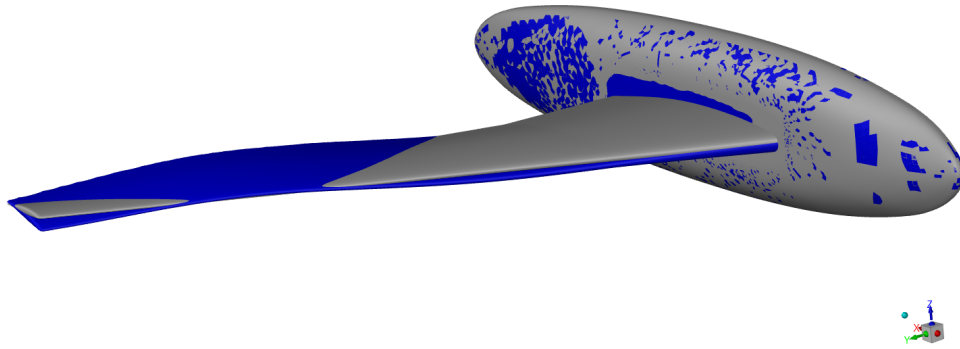


Figura 5.19: Mappa dell'errore considerando i primi tre modi

**Ansys**  
2022 R1

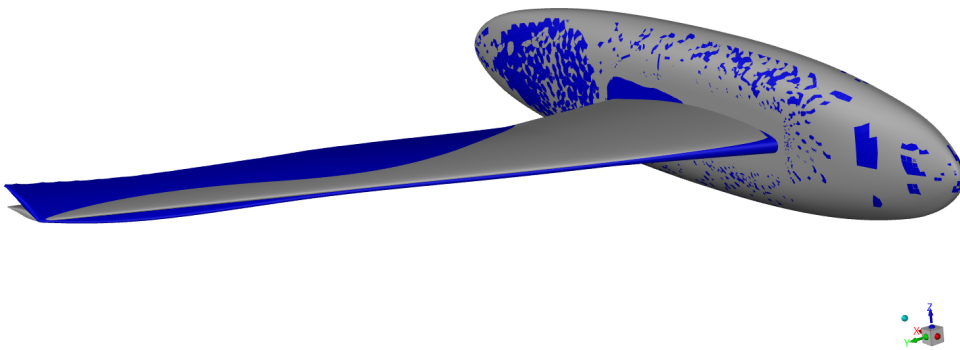


Figura 5.20: Mappa dell'errore considerando i primi quattro modi

**Ansys**  
2022 R1

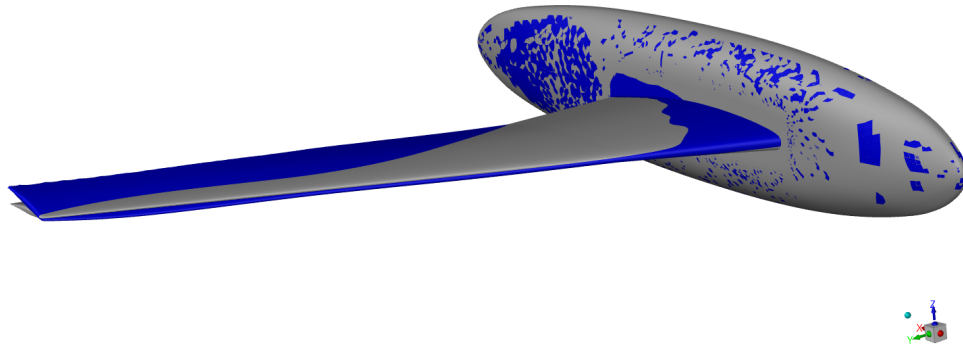


Figura 5.21: Mappa dell'errore considerando i primi cinque modi

**Ansys**  
2022 R1

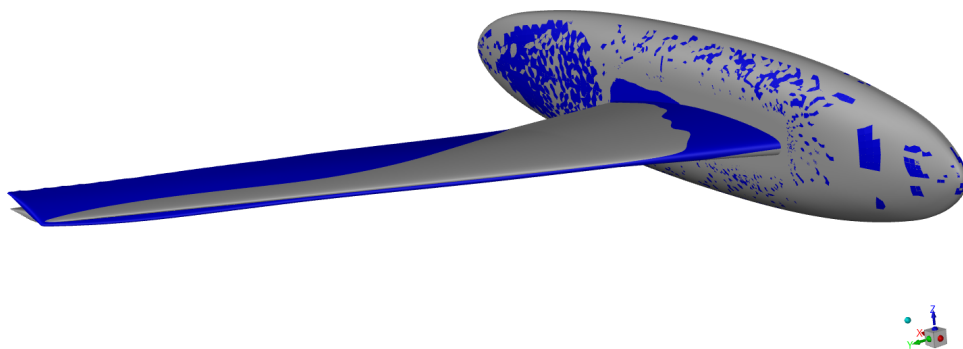


Figura 5.22: Mappa dell'errore considerando tutti i sei modi

Si riporta in figura 5.23 l'andamento degli spostamenti ottenuto mediante questa metodologia di analisi FSI. Il plot degli spostamenti è stato ottenuto grazie al prodotto scalare tra il vettore dei coefficienti di amplificazione delle forme modali e quello degli spostamenti, ma è ottenibile anche monitorando lo spostamento di un punto sul tip del profilo alare direttamente dentro Fluent. Si può osservare come l'andamento sia simile a quello ottenuto tramite l'analisi Two-Ways, il quale si può apprezzare in figura 5.7.

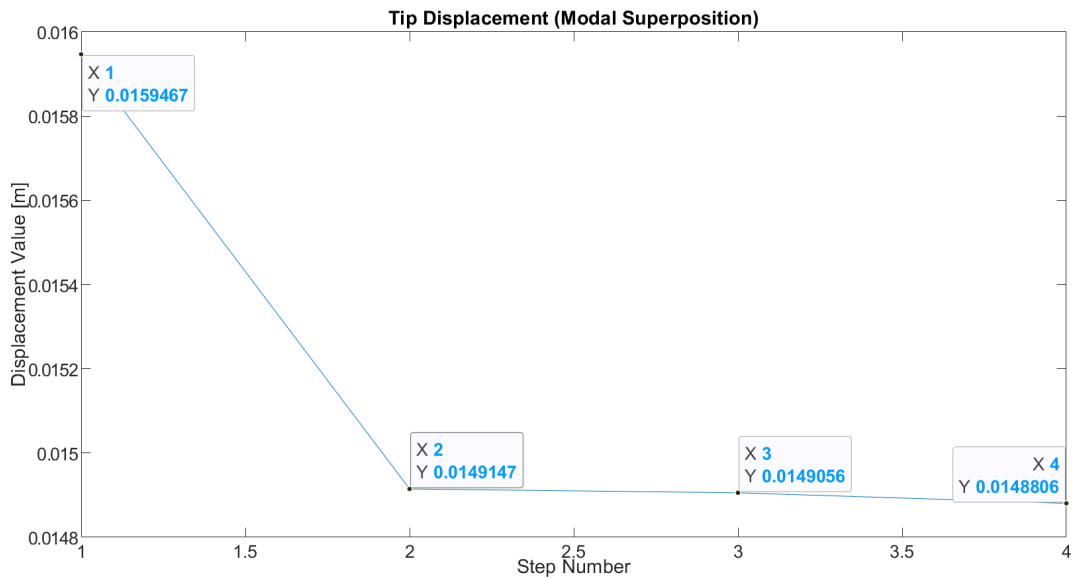


Figura 5.23: Spostamenti del tip di HIRENASD per il metodo di sovrapposizione modale

Vengono di seguito riportati i contour della pressione ottenuti per il caso base-line e per l'analisi con la metodologia di sovrapposizione modale, rispettivamente in figura 5.24 e 5.25.

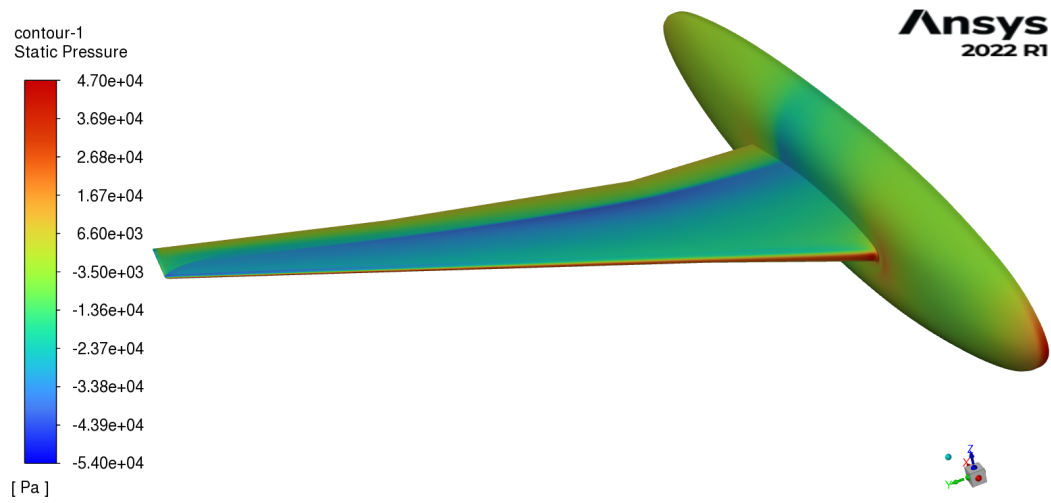


Figura 5.24: Contour della pressione nella configurazione baseline

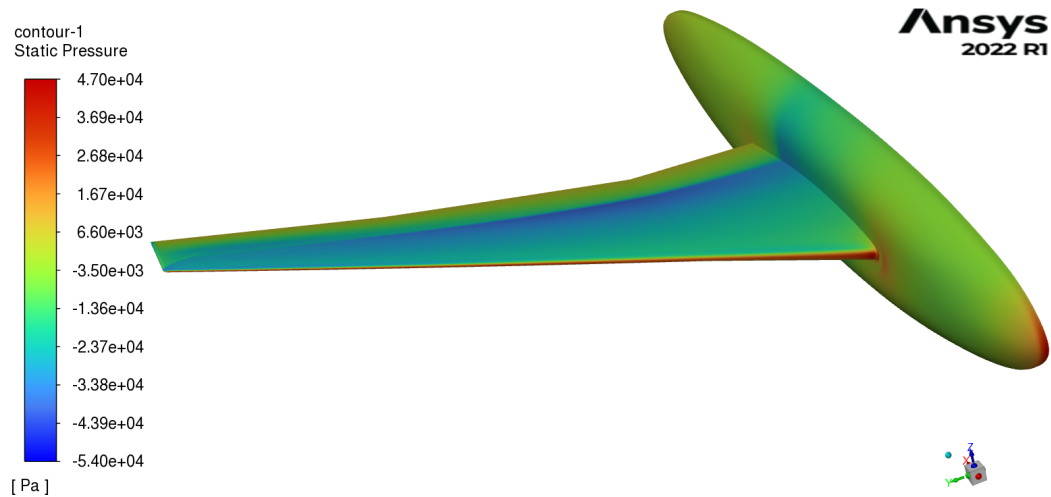


Figura 5.25: Contour della pressione ottenuto dal metodo di sovrapposizione modale

Anche in questo caso, confrontando le figure 5.24 e 5.25 si può evincere come il contour delle mappe di pressione presenti una differenza nei pressi del tip dell'ala. Si riportano infine in tabella 5.3 i coefficienti di Lift e Drag ottenuti

tramite il metodo di sovrapposizione modale, confrontati con quanto ottenuto nella configurazione baseline.

	Baseline	Two-Ways	$\Delta\%$
$C_L$	0.3568	0.3395	-4.85%
$C_D$	0.0137	0.0144	+5.11%

Tabella 5.3: Confronto in termini di  $C_L$  e  $C_D$  tra la soluzione baseline ed i risultati dell'analisi FSI svolta con la metodologia di sovrapposizione modale

In termini di  $C_L$  e  $C_D$  sono stati ottenuti gli stessi risultati dell'analisi FSI Two-Ways (consultabili in tabella 5.1), sempre a causa della variazione dell'angolo di attacco del profilo alare causata dalla deformazione strutturale.

## Capitolo 6

### Conclusioni e Sviluppi futuri

Analizzando i risultati, è evidente come entrambe le strategie di analisi FSI risultino valide. Si riportano nella tabella 6.1 i risultati ottenuti con le due metodologie esaminate per il case-study della piastra.

	Two-Ways	Modal
$C_L$	0.4160	0.4136
$C_D$	0.0029	0.0026

Tabella 6.1: Confronto in termini di  $C_L$  e  $C_D$  ottenuti mediante analisi Two-Ways e sovrapposizione modale per il caso della piastra

È immediato verificare come i risultati siano pressoché coincidenti. Difatti, anche in termini di spostamenti (riportati in tabella 6.2) le differenze tra le due metodologie sono minime.

	Two-Ways	Modal
Disps [mm]	190.53	199.36

Tabella 6.2: Confronto degli spostamenti ottenuti sulla piastra

Da quanto riportato in tabella 6.2, si può osservare come gli spostamenti ottenuti con il metodo di sovrapposizione modale risultino di 9mm più elevati rispetto a quanto ottenuto con la strategia Two-Ways. Ciò è giustificato dal fatto che in quest'ultima tipologia di analisi sono stati esportati i campi di pressione, pertanto non si è tenuto conto delle interazioni viscosse, le quali vengono invece considerate utilizzando la strategia di sovrapposizione modale. Nel caso in esame, la superficie laterale della piastra fornisce un gran contributo a questo fenomeno. Inoltre, si vuole rimarcare come questo studio sia stato implementato unicamente per verificare il funzionamento dei due workflow, pertanto ha valore unicamente educativo.

Per quanto riguarda il caso di HIRENASD, in base a come si può osservare dalla tabella 6.3, la metodologia di analisi seguita risulta ininfluente sui risultati ottenuti. Ciò si verifica in quanto l'oggetto in esame è un profilo alare, il quale è appositamente studiato per minimizzare le azioni viscosse.

	Two-Ways	Modal
$C_L$	0.3395	0.3395
$C_D$	0.0144	0.0144

Tabella 6.3: Confronto in termini di  $C_L$  e  $C_D$  ottenuti mediante analisi Two-Ways e sovrapposizione modale per il caso HIRENASD

Difatti, anche in termini di spostamenti (riportati nella tabella 6.4) si è ottenuto un valore quasi coincidente.

	Two-Ways	Modal
Disps [mm]	14.81	14.88

Tabella 6.4: Confronto degli spostamenti ottenuti nel caso HIRENASD



In figura 6.1 vengono riportati i risultati disponibili in [10] in termini di spostamenti del tip del profilo alare. Ricordando come l'angolo di attacco da considerare abbia un valore pari a  $1.5^\circ$ , dal confronto dei valori degli spostamenti calcolati nel presente caso con quelli disponibili in letteratura, dove si è ottenuto un valore pari a 14.26mm, si evince come quanto trovato sia in linea con i risultati attesi (si ha uno scarto pari a 0.6mm, pari al 4.2%), confermando la correttezza delle analisi svolte.

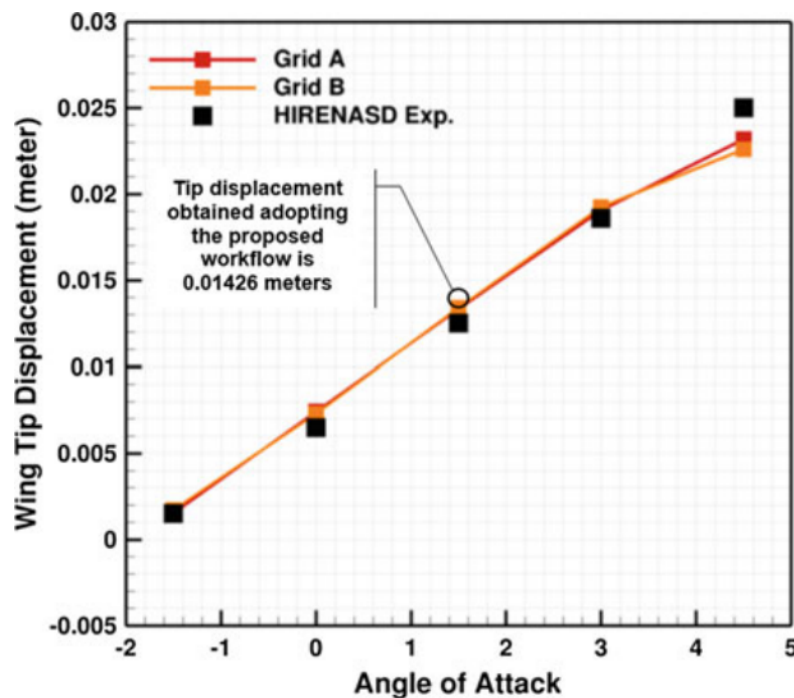


Figura 6.1: Spostamenti del tip di HIRENASD al variare dell'angolo di attacco [10]

Si vogliono infine analizzare le differenze temporali riscontrate nello svolgimento delle analisi. Queste sono state svolte su un server remoto equipaggiato con Intel Xeon Gold 6152, il tutto in ambiente Linux. In ambedue i casi sono stati utilizzati 20 threads. Si avevano a disposizione 256 Gb di RAM, i quali non sono mai stati saturati. In tabella 6.5 si riportano le tempistiche riscontrate

mediante il processo Two-Ways e quello di sovrapposizione modale. Si può notare come la prima richieda un tempo maggiore per lo svolgimento rispetto alla seconda, in quanto è necessario effettuare un maggior numero di iterazioni.

	Two-Ways	Modal
Time	4h 15min 2s	58min 59s

Tabella 6.5: Confronto in termini temporali delle analisi svolte sul caso HIRENASD

In base a quanto visibile nella tabella 6.5, si può affermare che la strategia di sovrapposizione modale consente di effettuare le analisi in un tempo minore. Difatti, nella strategia Two-Ways si eseguono 100 iterazioni per ogni step e si avranno pertanto 400 iterazioni in totale, mentre con la metodologia di sovrapposizione modale si ha l'esecuzione di 100 iterazioni, con l'aggiornamento delle coordinate modali previsto ogni 25 iterazioni. Inoltre, l'utilizzo del mapper di Fluent non consente tuttora di cogliere le interazioni viscosse, costituendo una limitazione all'impiego del processo Two-Ways. Si vuole inoltre ricordare come il metodo di sovrapposizione modale, caratterizzando il comportamento strutturale a partire da un'analisi lineare agli autovalori, vede il suo campo applicativo limitato a problemi in ambito lineare con (relativamente) piccoli spostamenti. La linearità preclude anche lo studio di fenomeni non lineari, quali i problemi di contatto o con pre-stress. Per verificare quale sia il numero di modi di vibrare da considerare, si può effettuare un'analisi di qualificazione della base modale, come effettuato nella sottosezione 5.2.2. Questo processo va messo in atto utilizzando le coordinate modali relative alla configurazione baseline, pertanto si può sapere quali saranno i modi partecipanti al campo deformativo prima di lanciare l'analisi di sovrapposizione modale. Tale operazione non richiede un tempo elevato (si aggira intorno ai 15 minuti), pertanto

si può asserire come da un punto di vista temporale la metodologia di sovrapposizione modale risulti la scelta vincente. Si vuole ricordare come i risultati trovati per il caso HIRENASD siano in linea con quanto disponibile in [10], confermando la correttezza della analisi svolte. Vista la coincidenza dei risultati ottenuti con ambedue le metodologie (i quali sono consultabili nelle tabelle riassuntive 6.3 e 6.4), si può affermare che queste strategie forniscono ambedue risultati affidabili. Si vuole anche rimarcare come entrambe siano automatizzabili, anche se ciò risulta più complesso nel caso del processo Two-Ways.

In definitiva, per la maggior parte dei casi applicativi non si può asserire che una metodologia sia migliore dell'altra in termini di affidabilità dei risultati. L'utilizzo di entrambe le metodologie risulta essere una strategia vincente: infatti, i software utilizzati sono gli stessi ed il confronto dei risultati ricavati con ambedue le strategie può essere utilizzato per validare quanto ottenuto. In termini temporali, invece, la metodologia di sovrapposizione modale risulta essere vantaggiosa: da come si evince in tabella 6.5, il tempo necessario per lo svolgimento di questa tipologia di analisi risulta essere pari a circa un quarto di quello impiegato per l'implementazione della strategia Two-Ways.

In ottica di sviluppi futuri, si vuole evidenziare come sia attualmente in sviluppo un metodo per mappare le forze in luogo delle pressioni. In tal maniera, si sarebbe in grado di cogliere anche le azioni viscosse durante il processo di mappatura del carico, e ciò porterebbe ad aumentare la precisione dell'approccio Two-Ways, migliorandone l'appetibilità.

# Appendice A

## Automazione del Metodo

### Two-Ways

Vista la necessità nell'approccio Two-Ways di interfacciare continuamente Nastran e Fluent, è stata realizzata una procedura tale da automatizzare completamente le analisi. Per avere una miglior comprensione degli script riportati in quest'appendice, si consiglia di visionare le guide di Nastran [22] e di Fluent [25]. Il primo passo consiste nella realizzazione di opportuni journal files e bulk data files, così da contenere tutti gli input necessari ai due solver per l'esecuzione delle analisi. Lato Nastran, il primo step è stato quello di esportare il .bdf contenente il modello e l'analisi di interesse con le impostazioni desiderate. In seguito, è stato aggiunto il comando INCLUDE (evidenziato in rosso, riga 32) con lo scopo di importare i carichi derivanti dalle analisi CFD. Si riporta di seguito questa parte del file .bdf relativo al caso HIRENASD.

```
1 INIT MASTER(S)  
2 NASTRAN SYSTEM(442)=-1, PARALLEL=4, SYSTEM(319)=1  
3 ID FEMAP,FEMAP  
4 SOL SESTATIC  
5 TIME 10000
```

```

6 CEND
7 TITLE = NX NASTRAN STATIC ANALYSIS
8 ECHO = NONE
9 DISPLACEMENT(PUNCH) = ALL
10 SPC = 1
11 LOAD = 1
12 BEGIN BULK
13 $ *****
14 $ Written by : Femap with NX Nastran
15 $ Version : 10.3.0
16 $ Translator : NX Nastran
17 $ From Model :
18 $ Date : Wed Aug 28 09:31:20 2013
19 $ Output To : C:\scratch
20 $ *****
21 $
22 PARAM,PRGPST,YES
23 PARAM,POST,-1
24 PARAM,OGEO,NO
25 PARAM,AUTOSPC,YES
26 PARAM,GRDPNT,0
27 EIGRL 1 60. 90. 1 0 MASS
28 CORD2C 1 0 0. 0. 0. 0. 0. 1.+FEMAPC1
29 +FEMAPC1 1. 0. 1.
30 CORD2S 2 0 0. 0. 0. 0. 0. 1.+FEMAPC2
31 +FEMAPC2 1. 0. 1.
32 INCLUDE 'pressure1fine.bdf'

```

Quindi, sono stati realizzati i journal files per automatizzare le parti di analisi svolte in Fluent. È stato necessario realizzare due differenti journal files per l'esportazione dei carichi e per lo svolgimento delle analisi, in quanto la prima risulta problematica quando si utilizza il calcolo parallelo. Di seguito si riporta il journal file relativo all'esportazione dei carichi. Si noti come questo script sia pensato per essere inserito in un ciclo, pertanto la prima riga verrà aggiornata tra un'iterazione e l'altra. In tal maniera, invece di generare un journal file per ogni step, è sufficiente utilizzare un singolo journal file e si può gestire il numero di iterazioni dallo script principale.

```

1 (define i 1)
2 /file/read-case step_0.cas.h5
3 (ti-menu-load-string (format #f "/file/read-data step_~a.dat.h5" (- i 1)))
4 file/fsi/read-fsi-mesh skin.bdf nastran m no ;; Reading Nastran mesh
5 (ti-menu-load-string (format #f "file/fsi/write-fsi-mesh no pressure~afine.bdf ...
nastran fuselage wingls wingus wingtip wingte () yes pressure yes" i))
6

```

7 exit

Di seguito si riporta il journal file inerente allo svolgimento delle analisi. Vale quanto detto per quello relativo all'esportazione dei carichi. Si noti come questo script sia pensato per leggere il solo dominio RBF (riga 13, evidenziato in rosso) per poi leggere gli spostamenti ottenuti mediante Nastran per l'iterazione in essere (riga 16, evidenziato in magenta).

```

1 ;; Loading .cas e .dat files
2 (define i 1)
3 /file/read-case step_0.cas.h5
4 (ti-menu-load-string (format #f "/file/read-data step_~a.dat.h5" (- i 1)))
5 ;; Loading RBF libraries
6 (my-open-udf-library rbf-library)
7 (for-each (lambda (ls)
8 (rpsetvar (car ls) (cadr ls))
9 ) rbf-default-config)
10 (call-udf "reset_source")
11 (set! rbf-moving-threads-set-number-old -1)
12 (set! rbf-moving-threads-motion-stl-calc-sol-list '(#t))
13 (read-rbf-config (string-append "base" ".rbf")) ;; Loading of the RBF Morph's points domain
14 (rpsetvar 'rbf/sol-name (string-append "step" (number->string i))) ;; the new ...
    name is patched in .sol and .rbf files.
15 (rpsetvar 'rbf/nastran-scale-disp-factor 1)
16 (process-nastran (string-append "step" (number->string i)) '(16) 1 1
    0.01) ;; Loading of the displacements found by Nastran
17 (source-points) ;; RBF solution calculation
18 (call-udf "rbf_solution")
19 (rpsetvar 'rbf/global-sol? #t)
20 ;;
21 (display (format #f "\nWriting file \"~a.rbf\" ... \n" (rpgetvar 'rbf/sol-name) ))
22 (write-rbf-config (string-append (rpgetvar 'rbf/sol-name) ".rbf"))
23 (call-udf "write_rbf_sol")
24
25 (my-close-udf-library rbf-library)
26 (rbf-morph-undo-enabled
27 (list
28 (list (string-append "step" (number->string i)) 1)
29 )
30 )
31 /solve/iterate
32 500
33 (morph-undo) ;; Morphing Undo
34 (ti-menu-load-string (format #f "wcd step_~a.cas.h5" i))
35 exit

```

Mediante uno script in Python vengono eseguiti Nastran e Fluent quando ne-

cessario. Le analisi automatizzate sono state svolte interamente in ambiente Linux: difatti, la scelta dell'utilizzo di Python è derivata dall'intrinseca integrazione di questo linguaggio di programmazione nel suddetto ambiente. Per comprendere meglio quanto svolto in questa fase, si consiglia di visionare la guida di Python [26]. Viene riportato di seguito lo script principale. Si noti come il codice dalla riga 5 alla riga 20 sia dedito a ripristinare le righe eventualmente modificate nei journal files da run precedenti.

```

1 import os
2 import time
3
4 #Reset journal files
5 file = (open("2way_hirenasd.jou", 'r'))
6 lista = list(file)
7 lista [1] = str("(define i 1)\n")
8 file.close
9 with open("2way_hirenasd.jou", 'w') as f:
10     for u in range (37) :
11         f.write(str(lista[u]))
12     f.close ()
13 file = (open("export.jou", 'r'))
14 lista = list(file)
15 lista [0] = str("(define i 1)\n")
16 file.close
17 with open("export.jou", 'w') as f:
18     for u in range (8) :
19         f.write(str(lista[u]))
20     f.close ()
21
22 n = 4 # Number of iterations
23 for i in range (1,n+1):
24
25     #Part 1: loads exportation
26     #Fluent is runned in single-core to avoid the segmentation fault error found ...
27     #           in multi-core runs
28
29     #
30     os.system('/ansys_inc/v221/fluent/bin/fluent fluent 3ddp -t1 -g -i export.jou')
31     path1 = str('/home/dregine/2vie_automatico/provanuova/pressure' + str(i) + ...
32             'fine.bdf')
33     isExist1 = os.path.exists(path1)
34     while isExist1 == False:
35         time.sleep(1)
36         isExist1 = os.path.exists(path1)
37
38     #
39     #Part 2: the first 15 rows of the loads files are deleted, so it can be ...
40     #           directly imported in the Nastran's bulk file
41
42     #

```

```

37     path = 'pressure' + str(i) + 'fine.bdf'
38     a_file = open (path,"r")
39     lines = a_file.readlines()
40     a_file.close()
41     del lines[0:14]
42     new_file = open(path, "w+")
43     for line in lines:
44         new_file.write(line)
45     new_file.close()
46     #
47     #Part 3: Nastran is launched with the batch=no instruction, so it will be ...
48     #         runned in foreground instead of in background. In this way, Fluent will ...
49     #         be launched only when Nastran will have finished the analysis
50     #
51     os.system(str('nastran "step' + str(i) + '.bdf" batch=no'))
52     os.system('/ansys_inc/v221/fluent/bin/fluent fluent 3ddp -t20 -g -i ...
53         2way_hirenasd.jou')
54     path2 = str('/home/dregine/2vie_automatico/provanuova/step_' + str(i) + '.cas.h5')
55     isExist2 = os.path.exists(path2)
56     while isExist2 == False:
57         time.sleep(1)
58         isExist2 = os.path.exists(path2)
59     # Update files for next step
60     #
61     file = (open("export.jou", 'r'))
62     lista = list(file)
63     lista [0] = str("(define i " + str(i+1) + ")\n")
64     file.close
65     with open("export.jou", 'w') as f:
66         for u in range (8) :
67             f.write(str(lista[u]))
68     f.close ()
69     #
70     file = (open("2way_hirenasd.jou", 'r'))
71     lista = list(file)
72     lista [1] = str("(define i " + str(i+1) + ")\n")
73     file.close
74     with open("2way_hirenasd.jou", 'w') as f:
75         for u in range (37) :
76             f.write(str(lista[u]))
77     f.close ()
78     #
79     step = str('step' + str(i+1) + '.bdf')
80     file = (open("step1.bdf", 'r'))
81     lista = list(file)
82     lista [31] = str("INCLUDE 'pressure' + str(i+1) + 'fine.bdf'\n")
83     file.close
84     with open(step, 'w') as f:
85         for u in range (780637) :
86             f.write(str(lista[u]))
87     f.close ()
88     path3 = str('/home/dregine/2vie_automatico/provanuova/' + step )
89     isExist3 = os.path.exists(path3)
90     while isExist3 == False:
91         time.sleep(1)

```



Una volta definiti opportunamente i files .jou e .bdf di un generico case-study, basterà modificare i percorsi presenti nello script in Python. Si noti come questo script sia pensato per lavorare con files .bdf esportati da Nastran: qualora si abbia un file .bdf generato in un'altra maniera, bisogna avere l'accortezza di verificare in quale riga sia opportuno inserire il comando INCLUDE, pertanto sarà necessario modificare il comando nella riga 80 dello script in Python andando a specificare la riga corretta in cui inserire il suddetto. Inoltre, bisogna aver cura di avere i file .cas, .dat, .jou e .bdf aventi lo stesso nome di quelli richiamati nello script e nei journal files. Se si vuole fare uso di files con nomi diversi rispetto a quanto preventivato, si devono opportunamente modificare i comandi che richiamano questi files.

Infine, si vuole mettere in evidenza come sia Nastran che Fluent siano fruibili tramite i files .bdf e .jou anche su Windows. Tuttavia, per rendere funzionante il presente script Python in quest'ambiente è necessario effettuare una modifica nella sintassi dei percorsi utilizzati, in particolare utilizzando doppi slash anziché slash singoli.

# Appendice B

## Ringraziamenti

Il mio percorso accademico è stato costellato da disavventure e momenti negativi, ma anche da momenti positivi. Le cose belle spesso avvengono grazie alle persone che abbiamo intorno, e per me è stato così. Pertanto, ritengo doveroso stilare una serie di ringraziamenti, anche se sarà molto complicato esprimere tutta la mia gratitudine in poche righe.

Vorrei innanzitutto ringraziare il mio relatore, il Professore Marco Evangelos Biancolini, per essere stato una fonte di ispirazione, una guida, per non avermi mai fatto mancare il supporto nello svolgimento della mia attività di tesi e per aver creduto nelle mie capacità. Ringrazio anche il Dottor Corrado Groth, il Dottor Andrea Lopez, il Dottor Stefano Porziani ed il Dottor Andrea Chiappa per essere sempre stati disponibili, per i preziosi consigli dispensatomi e per la grande cordialità che hanno sempre dimostrato.

Un ringraziamento va anche ai miei genitori ed a mio fratello Mario, per essere sempre stati presenti nei momenti di difficoltà. Mi avete insegnato a camminare sempre a testa alta ed a non aver mai paura di niente e di nessuno, facendomi capire qual è il mio vero valore. Abbiamo affrontato insieme tanti momenti di difficoltà e ne siamo sempre usciti vincitori. Finché affronteremo

le difficoltà insieme, niente potrà fermarci.

Ringrazio anche i miei zii Paola, Stefano e Lucio e le mie cugine Beatrice, Giulia ed Arianna per essere sempre stati presenti nel momento del bisogno e per aver sempre creduto in me. Il vostro supporto è stato cruciale e devo anche a voi il raggiungimento di questo traguardo.

Inoltre, ringrazio anche i miei amici, sia quelli di più vecchia data che quelli più recenti. Ricordo con piacere ogni momento passato con voi, siete stati presenti sia nello svago che nei miei momenti bui e grazie a voi ho avuto una grandissima crescita personale, giorno dopo giorno.

Infine, voglio ringraziare mia nonna Elsa. Quando mi sono sentito scoraggiato, mi sei sempre venuta in mente. Il sorriso che facevi quando passavo un esame mi ha sempre motivato ad andare avanti ed a fare sempre di meglio. Ti avevo promesso che avrei portato a termine questo percorso, e l'ho fatto. E so che, dovunque tu sia, sarai fiera di me, così come lo saranno nonno Domenico, nonno Mario e nonna Selene. E ti dico che voglio andare oltre questa promessa e puntare sempre più in alto, perché mi hai insegnato che gli unici limiti che abbiamo sono quelli che noi stessi ci imponiamo, e questo è un insegnamento che per me vale oro e che applicherò sempre e comunque, per tutta la vita.

# Bibliografia

- [1] Groth C. et al. “Radial Basis Functions Vector Fields Interpolation for Complex Fluid Structure Interaction Problems”. In: *Fluid Structure Interaction: Methods and Applications* (2021). DOI: <https://doi.org/10.3390/fluids6090314>.
- [2] Bazilevs et al. *Computational Fluid-Structure Interaction: Methods and Applications*. John Wiley & Sons: Hoboken, 2013. URL: <https://www.wiley.com/en-us/Computational+Fluid+Structure+Interaction:+Methods+and+Applications-p-9780470978771>.
- [3] Morand H. J. P. et al. *Fluid-Structure Interaction: Applied Numerical Methods*. John Wiley & Sons: Hoboken, 1995. URL: <https://www.wiley.com/en-us/Fluid+Structure+Interaction%3A+Applied+Numerical+Methods-p-9780471944591>.
- [4] Mittal R. et al. “Immersed Boundary Methods”. In: *Annual Review of Fluid Mechanics* 37 (2005), pp. 239–261. DOI: <https://doi.org/10.1146/annurev.fluid.37.061903.175743>.
- [5] Benra F. K. et al. *A Comparison of One-Way and Two-Way Coupling Methods for Numerical Analysis of Fluid-Structure Interactions*. 2011. DOI: <https://doi.org/10.1155/2011/853560>.

- 
- [6] Hou G. et al. “Numerical Methods for Fluid-Structure Interaction — A Review”. In: *Communications in Computational Physics* 12 (2012), pp. 337–377. DOI: <https://doi.org/10.4208/cicp.291210.290411s>.
- [7] Dowell E. H. et al. “Modeling of Fluid-Structure Interaction”. In: *Annual Review of Fluid Mechanics* 33 (2001), pp. 445–490. DOI: <https://doi.org/10.1146/annurev.fluid.33.1.445>.
- [8] Cella U. “Setup and Validation of High Fidelity Aeroelastic Analysis Methods Based on RBF Mesh Morphing”. Tesi di dott. Università degli Studi di Roma Tor Vergata, 2016.
- [9] Federici R. “Interazione fluido-struttura mediante tecniche di mesh-morphing”. Tesi di laurea mag. Università degli Studi di Roma Tor Vergata, 2011.
- [10] Groth C. et al. “Validation of High Fidelity Computational Methods for Aeronautical FSI Analyses”. In: *Flexible Engineering Toward Green Aircraft* 92 (2020), pp. 29–48. URL: [https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-030-36514-1\\_3](https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-030-36514-1_3).
- [11] Felici A. “Analysis of Vortex Induced Vibration of a thermowell by high fidelity FSI numerical analysis based on RBF structural modes embedding”. Tesi di laurea mag. Università degli Studi di Roma Tor Vergata, 2020.
- [12] Biancolini M. E. *Fast Radial Basis Functions for Engineering Applications*. Springer, 2017. URL: <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-319-75011-8>.
- [13] Biancolini M. E. et al. “Radial Basis Functions Vector Fields Interpolation for Complex Fluid Structure Interaction Problems”. In: *Fluid Struc-*

- ture Interaction: Methods and Applications* (2021). DOI: <https://doi.org/10.3390/fluids6090314>.
- [14] Cella U. et al. “Aeroelastic Analysis of Aircraft Wind-Tunnel Model Coupling Structural and Fluid Dynamic Codes”. In: *AIAA Journal of Aircraft* 49.2 (2012), pp. 407–414. DOI: <https://doi.org/10.2514/1.C031293>.
- [15] Biancolini M. E. et al. “Static Aeroelastic Analysis of an Aircraft Wind-Tunnel Model by Means of Modal RBF Mesh Updating”. In: *Journal of Aerospace Engineering* 29 (2016). DOI: [https://doi.org/10.1061/\(asce\)as.1943-5525.0000627](https://doi.org/10.1061/(asce)as.1943-5525.0000627).
- [16] *Aeroelasticità - Wikipedia*. URL: <https://it.wikipedia.org/wiki/Aeroelasticit%C3%A0>.
- [17] Mulone V. *Dispense del corso di Fluidodinamica delle Macchine 1*.
- [18] Kijewski T. et al. “Wind-Induced Vibrations”. In: *Encyclopedia of Vibration* (2001), pp. 1578–1587. DOI: <https://doi.org/10.1006/rwvb.2001.0155>.
- [19] Collar A. R. “The First Fifty Years of Aeroelasticity”. In: *Aerospace* 5.2 (1978), pp. 12–20.
- [20] *Crollo del Tacoma Narrows Bridge*. URL: <https://www.youtube.com/watch?v=e7Pjak3fBA4>.
- [21] *Ansys Fluent 12.0 Theory Guide*. URL: <https://www.afs.enea.it/project/neptunius/docs/fluent/html/th/node45.htm>.
- [22] *NX Nastran User's Guide*. URL: [https://docs.plm.automation.siemens.com/data\\_services/resources/nxnastran/10/help/en\\_US/tdocExt/pdf/User.pdf](https://docs.plm.automation.siemens.com/data_services/resources/nxnastran/10/help/en_US/tdocExt/pdf/User.pdf).
- [23] *Sito di RBF Morph<sup>TM</sup>*. URL: <https://www.rbf-morph.com>.

- 
- [24] *RBF Morph User's Guide*. 2022.
- [25] *ANSYS FLUENT 12.0 User's Guide*. URL: [https://www.afs.enea.it/project/neptunius/docs/fluent/html/ug/main\\_pre.htm](https://www.afs.enea.it/project/neptunius/docs/fluent/html/ug/main_pre.htm).
- [26] *Python 3.10.7 documentation*. URL: <https://docs.python.org/3>.