

ANALISI FLUIDO STRUTTURA DI UN'ALA ANTERIORE DI FORMULA 1

M.E. Biancolini^a

^a *Università degli Studi di Roma "Tor Vergata" - Dipartimento di Ingegneria Meccanica, Via Politecnico 1, 00133 Roma, e-mail: biancolini@ing.uniroma2.it*

Sommario

In questa memoria viene presentato un metodo per simulare numericamente i fenomeni di interazione fluido struttura. La forma della *mesh* di volume utilizzata per i calcoli CFD viene resa parametrica mediante un *morpher* utilizzando come forme i modi propri strutturali calcolati con un solutore strutturale FEM. Le forze modali vengono quindi integrate direttamente durante il calcolo CFD sui bordi della *mesh* di volume e consentono di calcolare il valore istantaneo delle coordinate modali sia nel caso statico che dinamico. Il modello parametrico CFD così ottenuto diventa elastico, ovvero capace di deformarsi sotto carico senza la necessità di ulteriori interazioni con il modello strutturale. Il metodo viene illustrato mediante un'applicazione industriale, l'analisi stazionaria di un'ala anteriore deformabile di una vettura di Formula 1, avvalendosi dei seguenti software: **NX Nastran** e **ANSYS Fluent®** abbinato all'*add-on RBF Morph™* per il *mesh morphing*.

Abstract

A method for fluid structure interaction numerical modeling is herein presented. The volume mesh used for CFD calculations is parameterized according to FEM computed structural modal shapes thanks to a morpher. Modal loads are directly integrated over the CFD mesh and allow to calculate actual values of modal coordinates both for static and transient problems. Such parametric CFD model with modes embedded becomes flexible, i.e. capable to deform its shape under structural loads without the need to further interact with structural FEM model. Proposed method is demonstrated with an industrial application, the steady study of a flexible Formula 1 front wing, using the following commercial software: **NX Nastran** and **ANSYS Fluent®** coupled with the mesh morphing add-on **RBF Morph™**.

Parole chiave: Fluent, RBF Morph, analisi modale, FSI (Fluid Structure Interaction).

1. INTRODUZIONE

I fenomeni di interazione fluido struttura complicano notevolmente lo studio di alcuni componenti. Tale complicazione non è solo legata alla maggiore difficoltà che si ha nell'analisi e nella modellazione di tali fenomeni, ma dipende molto spesso dalla complessa interazione fra gli strutturalisti e i fluidodinamici. Ed è proprio per questo motivo che molto spesso vengono scelte soluzioni costruttive tali da minimizzarli: una struttura sufficientemente rigida consente di studiare la fluidodinamica del componente trascurandone le deformazioni; i carichi prodotti dal fluido possono poi essere trasferiti per la verifica strutturale provvedendo ad irrigidire e ad irrobustire la struttura in modo da rispettare i vincoli di resistenza e di deformabilità.

Esistono alcune applicazioni per le quali l'interazione fra fluido e struttura non può però essere trascurata. In alcuni casi infatti tale interazione è la chiave di funzionamento del componente (come ad esempio le valvole automatiche a lamella, o il movimento di un foglio di carta in una macchina da

stampa), in altri non ci si può permettere di appesantire la struttura ed è quindi necessario controllarne le deformazioni sotto carico (aeromobili), in altri ancora (Formula 1) una modellazione accurata del fenomeno per avvantaggiarsi delle deformazioni può portare ad un incremento di prestazione e rendere la vettura più competitiva.

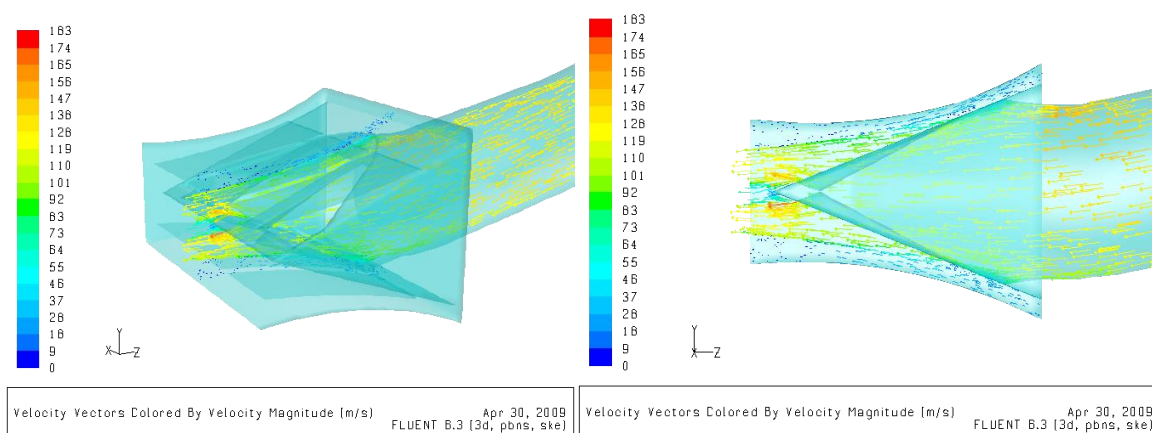


Figura 1: Analisi accoppiata fluido struttura di un pacco lamellare per motori due tempi [7]. Il movimento individuale di ognuno dei sei petali viene risolto utilizzando il solutore dinamico incorporato dentro al software CFD Fluent.

L'interesse nella modellazione di problemi di interazione fluido struttura a Tor Vergata è nato da una collaborazione fra fluidodinamici e strutturisti spinta dall'esigenza di risolvere un problema industriale. Si trattava di modellare la dinamica di una valvola a lamella [1] utilizzata per il controllo della quantità di aria nel sistema di scarico di un motore a due tempi [2]. La soluzione al problema industriale è stata ottenuta realizzando un solutore FEM (implementato sia in FORTRAN che in C) basato sulla teoria della trave piana che è stato successivamente integrato ad un solutore gasdinamico sviluppato presso l'università di Perugia e quindi al solutore gasdinamico commerciale **BOOST** della **AVL**. Il successo di questo primo esperimento ha spinto gli autori ad estendere il metodo integrando il solutore FEM all'interno del solutore CFD commerciale **Fluent** ottenendo dei risultati molto interessanti nel caso delle valvole a lamella utilizzate per l'aspirazione dei motori a due tempi [3]. Questo primo studio ha aperto la strada a nuove applicazioni industriali: lo studio del moto di un foglio di carta all'interno di una macchina da stampa (2D e 3D usando FEM esplicito) [4], lo studio in un'ala anteriore di Formula 1 [5] (usando in questo caso le matrici di massa e rigidità generate avvalendosi del solutore FEM **Nastran**), lo studio 3D (vedi Figura 1) di un intero gruppo di aspirazione costituito da 6 valvole a lamella [7]. I risultati ottenuti per alcuni studi 2D sono stati organizzati in maniera sistematica e pubblicati nel 2008 [6].

E' importante notare che in tutti gli studi citati la soluzione al problema industriale è stata ottenuta integrando un modulo custom capace di gestire la dinamica della struttura mediante una libreria FEM proprietaria (in alcuni casi supportata da un solutore FEM commerciale ma solo in fase di generazione del modello dinamico) all'interno del solutore CFD commerciale **Fluent**. Questo approccio ha consentito di disporre di un solutore accoppiato (basato sull'accoppiamento debole) direttamente nella piattaforma di calcolo CFD evitando tutti i colli di bottiglia legati allo scambio di informazioni fra fluido e struttura. E' interessante osservare che il calcolo strutturale richiede normalmente risorse di calcolo assai inferiori rispetto a quello fluidodinamico (tipicamente 1-2%).

Gli aspetti più critici del metodo descritto sono: forte dipendenza dal solutore CFD, uso di *mesh* conformi all'interfaccia fra struttura e fluido, uso degli algoritmi di movimento della *mesh* di volume del **Fluent**.

In particolare per lo *smoothing* della *mesh* di volume (ovvero il cambiamento della forma mediante riposizionamento dei nodi senza aggiungere o rimuovere celle) il **Fluent** utilizza il metodo delle molle. Tale metodo risulta molto veloce ma è difficile da calibrare e porta spesso a *mesh* di bassa qualità o non valide (volumi negativi).

Uno degli elementi fondamentali per un'implementazione robusta di una soluzione accoppiata fluido struttura è dato proprio dal *morpher*, ovvero dallo strumento capace di adattare la forma della *mesh*

fluidodinamica in base alle deformazioni ottenute con il calcolo strutturale. Si possono ottenere dei risultati migliori considerando la *mesh* fluidodinamica come un dominio elastico deformabile [8]; tale metodo ha però il difetto di essere *mesh* dipendente ed è quindi difficile da implementare in parallelo e con *mesh* di tipo generico (tipologie varie di elementi, interfacce non conformi, *hanging nodes*). Un metodo assai più promettente consiste nell'utilizzare le *Radial Basis Functions* (RBF) che abbinano la precisione di un metodo basato sulla *mesh* ai vantaggi di un metodo *meshless* (parallelismo, capacità di gestire qualsiasi tipo di elemento). Il metodo è stato usato su un caso applicativo [9] sulla simulazione del volo di un insetto utilizzando il solutore CFD **OpenFOAM** e le RBF per il movimento della griglia, un altro esempio applicativo [10] dimostra la grande qualità delle RBF per il movimento della *mesh* di volume e il metodo ben si presta non solo agli studi interazione fluido struttura, ma anche alle parametrizzazioni di forma in generale mirate alle ottimizzazioni dei componenti [11]. Tutti gli studi presentati sono però limitati a piccoli esempi accademici di scarso interesse industriale.

La prima implementazione industriale del metodo delle RBF per il *mesh morphing* di modelli CFD di grandi dimensioni è data dal software **RBF Morph** [12], nato inizialmente per un top team di Formula 1 e successivamente reso disponibile come *add-on* per il solutore CFD **ANSYS Fluent** [13, 14]. Una descrizione approfondita del metodo alla base del software e di esempi applicativi è riportata in [15].

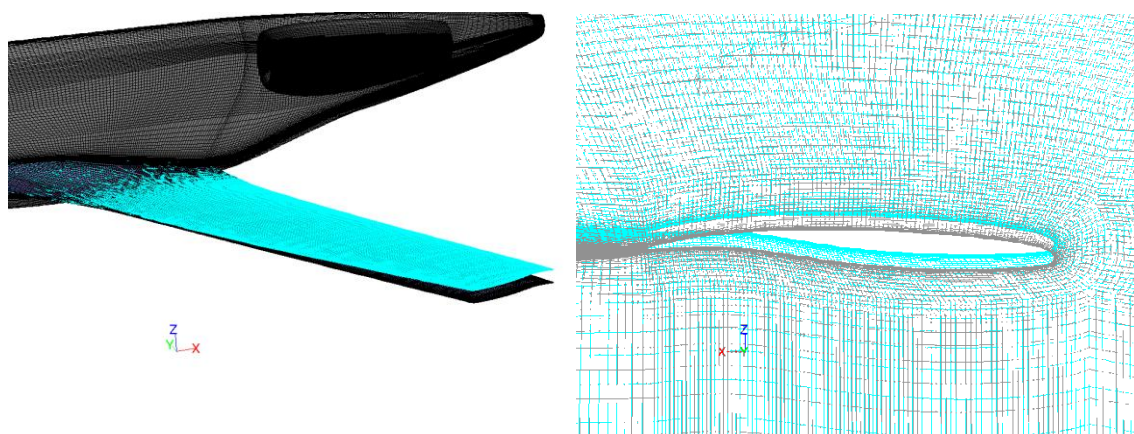


Figura 2: Analisi aeroelastica di un aeromobile [16]. La deformazione FEM ottenuta con i carichi aerodinamici viene utilizzata per aggiornare la *mesh* CFD fino ad ottenere la convergenza.

Tale strumento si è dimostrato molto robusto anche per applicazioni industriali; il primo esempio applicativo è nato nell'ambito di una collaborazione con la **Piaggio Aero** [16]. Si trattava in questo caso di adeguare la forma del modello CFD per considerare l'effetto della deformabilità. Si osservava infatti una discrepanza significativa fra i risultati ottenuti in galleria del vento e i risultati ottenuti con il calcolo CFD (svolto in questo caso mediante il solutore commerciale **CFD++** usando una *mesh* di 14 milioni di celle, vedi Figura 2), specialmente sulle zone dell'ala più lontane dalla radice. Seguendo un approccio simile a quello presentato in [17] si è deciso di integrare il *morpher* all'interno della catena di simulazione (avvalendosi del **Fluent** e di **RBF Morph** per modificare la forma della *mesh*, **Nastran** per il calcolo delle deformazioni e **Patran** per trasferire i carichi aerodinamici al modello strutturale) migliorando notevolmente la correlazione con i dati sperimentali; e la forte deformabilità dell'ala gioca in questo caso un ruolo fondamentale.

Questo approccio richiede un certo numero di iterazioni per ottenere la convergenza (per l'applicazione in esame normalmente sono necessarie 4 iterazioni). Ed ogni iterazione richiede una nuova esecuzione delle analisi. Vista la notevole complicazione legata allo scambio di informazioni è stato messo a punto un nuovo metodo, oggetto della presente memoria, basato sulla teoria modale che consente di ridurre al minimo l'interazione fra il solutore strutturale e quello fluidodinamico. In questo caso lo studio è stato svolto ancora nel campo della ali ma per un'applicazione industriale molto diversa: l'ala anteriore in una vettura di Formula 1. Il compito dell'ala è in questo caso assai diverso: si tratta di ali deportanti progettate al limite dello stallo per ridurre le perdite ad alta velocità; tuttavia in entrambe le applicazioni il peso è critico e si hanno strutture leggere e molto deformabili.

2. METODO PROPOSTO

Il metodo consiste nel calcolo di una base modale mediante il metodo degli elementi finiti (**NX Nastran** in questo esempio), normalizzate rispetto alla massa per ridurre al minimo il numero di informazioni da scambiare. Le forme modali di ala e supporti vengono esportate come nuvola di punti a spostamento noto ed utilizzati come dato di ingresso per il software di *mesh morphing* **RBF Morph**. Il software dispone di un interfaccia in grado di leggere i risultati del solutore **Nastran** dall'output file ASCII “*.pch” formattato utilizzando la direttiva di output PUNCH del **Nastran**; la topologia della mesh viene letta dal file ASCII di formato standard “*.bdf” utilizzato per descrivere il modello Nastran secondo la notazione a schede (Nastran Data Deck). Come già illustrato nell'introduzione, **RBF Morph** è un *add-on* per il solutore CFD **ANSYS Fluent**, e ne estende le potenzialità mettendo a disposizione dell'utente delle nuove funzioni per il controllo avanzato del movimento della mesh.

L'estrazione delle informazioni dalla *mesh* FEM, che tipicamente non è conforme a quella CFD ed è più rada, viene gestita in due momenti. Dopo avere creato una lista di associazione fra le etichette delle superfici bagnate nel **Fluent** (nomi dei *thread*) e le *Property ID* (PID) della *mesh* **Nastran** vengono creati e risolti tanti sottoproblemi RBF per quante sono le associazioni; ognuno di essi consente di ottenere l'interpolazione del campo FEM su una zona del modello; in un secondo passo si procede poi al completamento del problema di *morphing* per l'intero volume che viene completato limitando il volume di *morphing* con un box, ed imponendo un moto nullo a tutti i punti appartenenti al modello che cadono nel volume di *morphing* e la cui posizione deve essere preservata.

E' molto importante notare che in questo modo è possibile gestire problemi molto complessi in cui, pur avendo coincidenza fra le superfici indeformate, si possano creare delle violazioni topologiche sul modello deformato. Nel caso dell'ala ciò può capitare se delle superfici ad un'intersezione possono scorrere di moto relativo (*mesh* FEM separate); ma la *mesh* CFD è continua nella stessa zona. In questo caso è sufficiente creare delle PID ausiliare su delle superfici all'interfaccia in modo che le *mesh* FEM presentino un gap, questo consente di compensare gli scorrimenti con delle deformazioni locali della *mesh* CFD.

La procedura viene estesa in modo automatico al numero di modi desiderati. Alla fine di questa fase di trasferimento dei modi si disporrà di una base di soluzioni RBF nel formato standard di **RBF Morph** (tante soluzioni quanti sono i modi). Utilizzando i comandi standard di **RBF Morph** che consentono di cambiare la forma della *mesh* combinando un numero arbitrario di forme è quindi possibile rendere parametrica la *mesh* rispetto alle coordinate modali. Per accedere alle funzionalità avanzate che consentono di utilizzare la funzione FSI è necessario inizializzare un modulo aggiuntivo del software (**rbf-fmorph**) che consente di caricare in memoria le informazioni per aggiornare la forma di tutta la *mesh* di volume CFD al variare del valore delle coordinate modali.

Il modulo consente inoltre di calcolare gli integrali modali direttamente sulla *mesh* CFD; ciò significa che nel caso stazionario è sufficiente dividere la forza modale per la rigidità modale (che risulta pari al quadrato della pulsazione angolare) per ottenere il valore istantaneo della coordinata modale.

Per verificare la correttezza del metodo (nel caso stazionario) è possibile generare una soluzione di riferimento con un calcolo completo accoppiato. In questo caso si procede ad uno scambio di informazioni iterativo che consiste nell'aggiornare via via la *mesh* CFD utilizzando le deformate FEM le quali vengono aggiornate ad ogni iterazione in base all'evoluzione del campo di pressione. In questo caso si è fatto uso di un ulteriore *tool* del **Fluent** (*FSI mapping*) che consente di caricare un modello FEM utilizzando i risultati del calcolo CFD. Per l'aggiornamento della *mesh* si è usato il software **RBF Morph**, in questo caso non per rendere parametrica la *mesh* ma per trasferire il valore ottenuto per la *mesh* deformata. E' importante notare che le pressioni ottenute sulla *mesh* CFD deformata vengono prima lette sul modello CFD indeformato e poi trasferite al FEM (la cui *mesh* non cambia forma durante le iterazioni). Le informazioni vengono scambiate fino a quando non si ottiene una forma stabile. Tale metodo può essere esteso anche a problemi non lineari, ma è lento e richiede lo scambio di una grande quantità di informazioni ad ogni iterazione.

E' importante sottolineare che con il metodo di incorporamento dei modi non è più necessario scambiare tali informazioni. Il modello CFD diventa infatti “elastico” ovvero include la dinamica strutturale e può essere utilizzato per analisi stazionarie e transitorie (anche per condizioni al contorno differenti) fintanto che la struttura (e quindi i modi) non vengono cambiati.

3. PROBLEMA INDUSTRIALE

Il problema industriale riguarda lo studio della parte anteriore di una vettura di Formula 1. La geometria è rappresentata nella figura 3 e comprende il muso della macchina (*Body*), la ruota anteriore (*Wheel*), l'attacco della'ala al muso (*Pylon*), e l'ala costituita dai due profili alari (*Main*, *Flap*), collegati dalla *End Plate*; è presente anche una *Fence* per contenere i flussi trasversali e convogliare il flusso sulla ruota.

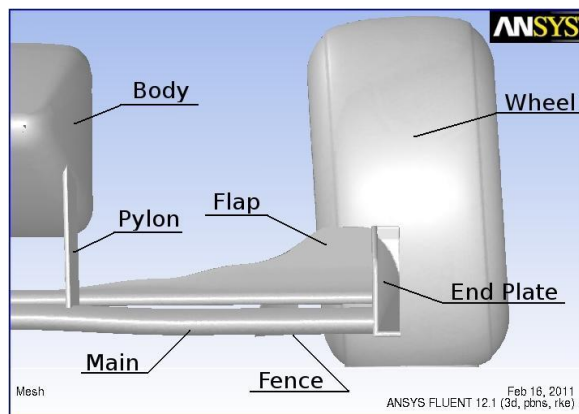


Figura 3: Geometria della parte anteriore della vettura di Formula 1 usata per lo studio FSI.

E' interessante osservare che dal punto di vista strutturale il collegamento fra ala e vettura avviene solo tramite i due supporti verticali e che il *Flap* è collegato alla macchina tramite il *Main*, in cui si connette in corrispondenza della *End Plate* rendendo la struttura assai flessibile, bisogna infatti ricordare che i carichi deportanti possono raggiungere valori molto elevati (la deportanza può arrivare a triplicare il peso della vettura).

La geometria è di proprietà della ANSYS Inc. ed è stata messa a disposizione dalla ANSYS UK; si dispone sia del modello CAD che della *mesh* **Fluent** in varie versioni (tetraedri, *hexcore*, poliedri). Per questo studio si è usata la *mesh* a tetraedri composta da circa 3 milioni di celle; la *mesh* è infittita in prossimità delle superfici dove presenta tre strati di prismi per risolvere accuratamente lo strato limite. Per il modello FEM si è in questo caso usato la stessa *mesh* di superficie del modello CFD; poiché non si disponeva di dati precisi sui materiali si è utilizzato un materiale fittizio, ovvero acciaio con uno spessore uniforme per tutti i componenti dell'ala e tale da dare una deformazione di 7 mm alla velocità di 126 km/h.

4. SET-UP DEL CALCOLO NUMERICO

Si descrivono in dettaglio solo le fasi del calcolo specifiche per il calcolo accoppiato; la definizione del modello fluidodinamico **Fluent** utilizzato per i calcoli aerodinamici e del modello strutturale **Nastran** utilizzato per il calcolo dei modi seguono infatti le normali procedure consolidate nella pratica industriale.

Per il trasferimento dei modi ci si avvale dell'interfaccia grafica (GUI) e dell'interfaccia di testo (TUI) del modulo RBF Morph. Il singolo modo viene prima letto e quindi utilizzato per generare una soluzione rbf valida per ogni set di superfici (in questo caso si è usato un solo set). Si dispone in questo modo del campo di deformazione FEM direttamente sulla griglia CFD; il set-up viene completato in un secondo passo in cui si utilizza come dato di ingresso per la parte deformabile il campo di deformazione precedentemente interpolato, si impone poi un vincolo alle parti che non devono essere deformate (in questo caso la ruota, il pavimento e il muso della vettura), si aggiunge poi un box per limitare il campo di azione del *morpher*, sul bordo di tale box viene piazzata una distribuzione di punti in modo da garantire una deformazione nulla. I punti così definiti sono rappresentati in figura 4; a sinistra vengono riportati i punti definiti sulle superfici del modello CFD (il set verde è controllato dalla deformazione FEM, il set rosso viene mantenuto fermo); a destra vengono riportati tutti i punti usati per il set-up includendo anche il box. Tale operazione viene svolta utilizzando l'interfaccia grafica solo per il primo modo fino a che non si ottengono risultati

soddisfacenti che possono essere verificati mediante gli strumenti di *preview* (disponibili sia su superfici che su tagli della *mesh* di volume) e mediante prove di *morphing*; il set-up viene poi replicato cambiando solo i dati di input (ovvero il modo FEM) mediante uno script.

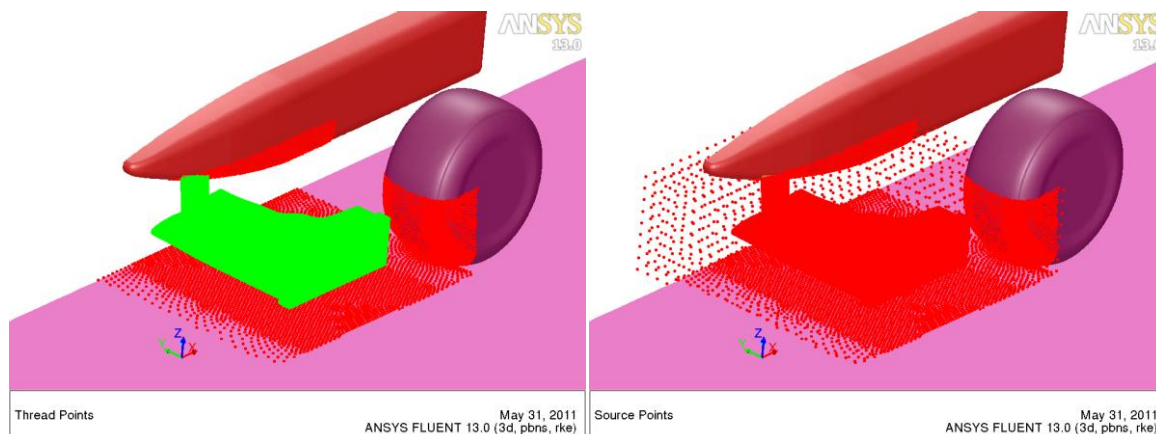


Figura 4: Definizione del problema di *mesh morphing* utilizzando RBF Morph.

Il set-up viene quindi completato attivando il modulo FSI mediante il comando (**rbf-fmorph-init**) che consente di caricare in memoria i modi così che l'update della *mesh* avvenga in tempi molto brevi e consente inoltre di disporre della funzione per il calcolo degli integrali modali, i quali vengono calcolati direttamente sulla *mesh* CFD essendo su questa noti sia gli spostamenti che le forze. Al termine del calcolo il modulo FSI viene scaricato mediante il comando (**rbf-fmorph-end**).

L'update della *mesh* nel caso stazionario è molto semplice poiché si tratta di dividere la forza modale per la rigidità modale (ovvero il quadrato della pulsazione angolare); ciò viene fatto nel **Fluent** mediante una *calculation activity* ovvero un comando richiamato automaticamente con un intervallo desiderato (in questo caso ogni 25 iterazioni). Il comando custom (**modal-q-update-static**) viene in questo caso definito utilizzando il linguaggio scheme ed ha la seguente sintassi:

```
(define (modal-q-update-static)
;; calculate modal forces
(set! modal-forces (rbf-fmorph-forces ('("front_wing_flap" ... "fin"))))
;; update q = F / k
(set! modal-q (map / modal-forces modal-k))
;; update mesh
(rbf-fmorph (list (list "mode1-new" (list-ref modal-q 0)) ...)))
)
```

La funzione **modal-forces** consente di ottenere la lista delle forze modali (una per modo) agente sulla lista di superfici passata come argomento. Le variabili modali **modal-q** vengono in questo caso aggiornate dividendo la forza modale per la rigidità modale e quindi utilizzate nel comando vero e proprio di movimento della griglia **rbf-smorph** in cui ogni modo viene amplificato usando il valore ottenuto per la coordinata modale. Nel caso transitorio (non presentato in questa memoria) tale funzione ha forma più complessa poiché deve provvedere all'integrazione nel tempo delle coordinate modali e delle sue derivate; solo la forma è complessa poiché visto l'esiguo numero di gradi di libertà in gioco, tale calcolo ha un peso numerico trascurabile. Nel caso transitorio le coordinate modali vengono aggiornate ad ogni passo di calcolo temporale della soluzione CFD.

5. RISULTATI

Per verificare la correttezza dell'operazione di trasferimento dei modi nel modulo **RBF Morph** si è proceduto alla loro visualizzazione mediante lo strumento di *preview* che consente di visualizzare l'effetto di una singola soluzione o di combinarne un numero arbitrario di soluzioni (i primi 4 modi mostrati in figura 5) variandone l'amplificazione. Si è utilizzato un valore nominale massimo

dell'amplificazione pari a 0.02; i valori effettivi usati durante il calcolo dipenderanno ovviamente dalle forze in gioco ma l'ordine di grandezza osservato è simile.

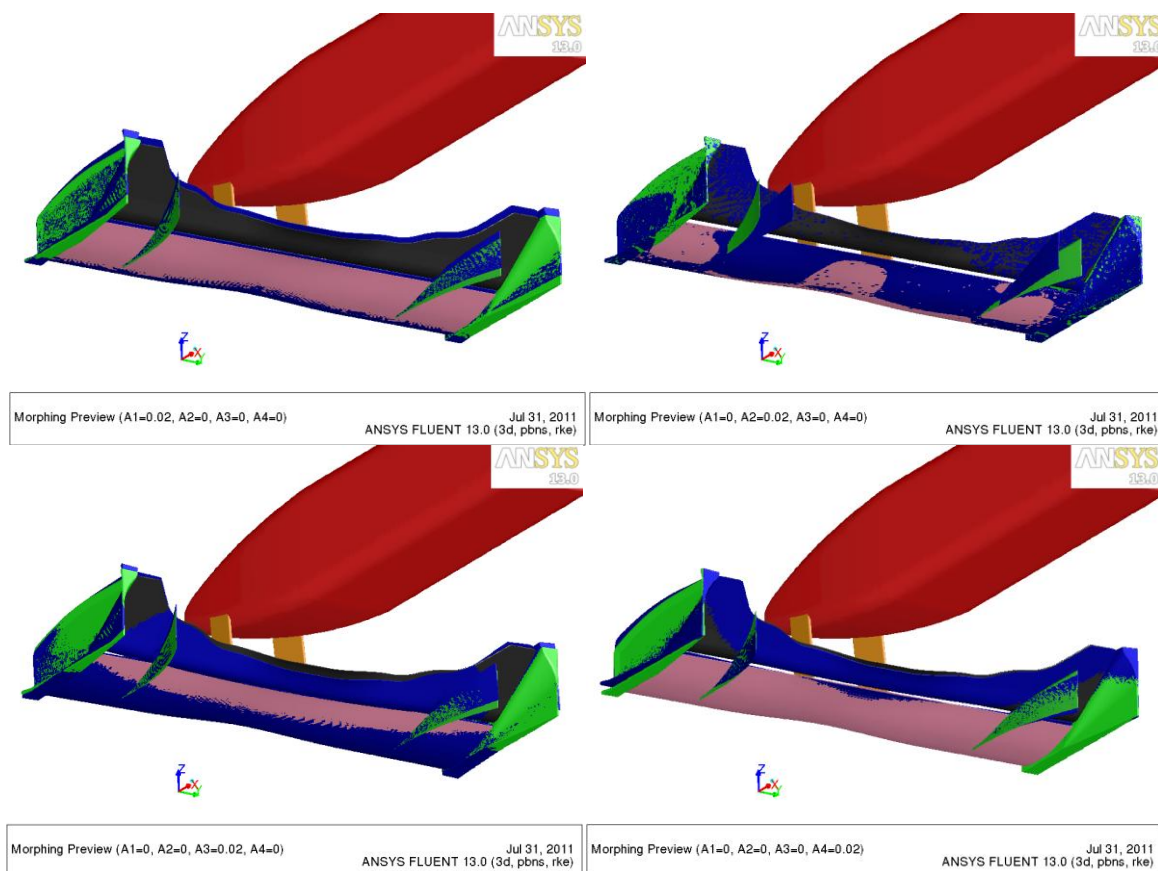


Figura 5: Visualizzazione dei primi 4 modi utilizzando lo strumento di preview di RBF Morph. Il primo modo è globale di tutta l'ala (abbassamento e rotazione), il secondo modo è locale della *Fence*, il terzo modo coinvolge principalmente il *Flap*, il quarto modo è dato da una flessione dell'intera ala (nodo in corrispondenza degli attacchi e spostamento massimo sulla *End Plate*).

La soluzione accoppiata costituisce un buon punto di riferimento per valutare la convergenza del metodo modale rispetto al numero di modi introdotti; per confrontare rapidamente i due approcci ci si è avvalsi anche in questo caso dello strumento di *preview* disponibile nel software **RBF Morph**. Sono state caricate in questo caso 6 soluzioni, i primi 5 modi e come sesta forma il risultato dell'analisi accoppiata completa.

Tabella 1: Spostamento massimo a 126 km/hr; confronto fra metodo modale e metodo accoppiato aumentando il numero dei modi utilizzati da 1 a 5.

Mode	Max d [mm]	Max err [mm]	Max err [%]
1	7,19	1,61	22,39
2	7,19	0,86	12,00
3	6,98	0,85	12,15
4	6,90	0,66	9,50
5	6,85	0,19	2,76
2 Ways FSI	6,98	0,00	0,00

E' infatti sufficiente assegnare ai primi 5 modi i valori delle coordinate modali ottenuti dopo la convergenza e per la sesta forma il valore -1 per ottenere la mappa dell'errore; ed è possibile valutare

il contributo di un numero minore di modi annullando i valori dei contributi dei modi di ordine superiore.

I risultati di questa analisi sono sintetizzati nella tabella 1; come si può osservare dai risultati l'errore risulta pari al 22.4% utilizzando solo il primo modo e si riduce a meno del 3% utilizzando i primi 5 modi. E' interessante poi osservare che la forma dell'errore di troncamento al modo i -esimo ha generalmente una forma pari a quella del modo successivo.

Per valutare l'effetto della deformabilità alla velocità di riferimento si è poi deciso di controllare come variano le forze aerodinamiche. Come si può osservare dalla tabella 2 dove tali forze sono riportate per l'intera ala e per le singole parti, l'effetto della deformabilità porta a variazioni della resistenza del 10% e della deportanza di circa 1,5%. Valori tutt'altro che trascurabili, specialmente per una vettura da competizione.

Tabella 2: Valori delle forze aerodinamiche (F_x è la resistenza, F_z è la portanza, F_y è il carico trasversale agente su mezzo modello). Valori riferiti al caso deformato, i valori dF_x , dF_y , dF_z rappresentano le differenze percentuali con il caso rigido.

Part	F_x	F_y	F_z	dF_x	dF_y	dF_z
	[N]	[N]	[N]	[%]	[%]	[%]
<i>Fin</i>	1,00	1,21	0,07	-0,52	2,93	1,21
<i>Flap</i>	30,56	-0,38	-67,30	3,84	-23,15	0,35
<i>Main</i>	12,61	6,48	-319,94	30,60	-2,22	1,73
<i>Plate</i>	5,45	11,48	-19,37	5,12	-1,18	1,07
<i>Vane</i>	4,95	19,23	-0,71	3,41	1,70	-1,50
Total	54,57	38,02	-407,25	10,04	0,45	1,46

L'esempio è stato poi completato mostrando come sia possibile calcolare i parametri di forza agenti sull'ala (Resistenza e Deportanza) al variare della velocità nell'intervallo 54 km/hr – 162 km/hr; è interessante osservare che abilitando l'update della *mesh* ogni 25 iterazioni CFD si ottiene la convergenza del calcolo in circa 250 iterazioni, ovvero al costo di una normale simulazione a pareti rigide; è inoltre importante sottolineare come l'analisi parametrica al variare della velocità di ingresso considerando l'ala flessibile è stata svolta nella stessa sessione di **Fluent** senza bisogno di dover scambiare informazioni con il solutore FEM. I risultati di tale analisi parametrica in termini di mappa di pressione e di linee di flusso sono mostrate nelle figure 6 e 7.

Le prestazioni del metodo sono state quindi riassunte nella tabella 3 dove è possibile osservare che il tempo di update della *mesh* risulta molto contenuto rispetto al tempo della singola iterazione CFD; questo significa che il metodo può essere applicato in modo efficiente anche per analisi transitorie per le quali l'update della *mesh* ad ogni passo di calcolo risulterebbe eccessivamente oneroso usando il metodo a due vie con scambio delle informazioni fra FEM e CFD ad ogni passo temporale.

Tabella 3: Prestazioni del metodo proposto utilizzando un laptop Linux 64 bit, Intel® Centrino2 dual-core processor, 2.26GHz 8GB, RBF Morph 1.3 e Fluent 13.

Task	Time	Time
	[s]	[days]
CPU Time to fit each mode (120.000RBF points)	190	-
CPU Time to init 5 modes 117 s	117	-
CPU Time for each mesh update using 5 modes 3 s	3	-
CPU Time for a CFD iteration 15 s	15	-
User Time to set-up modes	-	0,5
User Time to set-up CFD + modal simulation	-	0,5

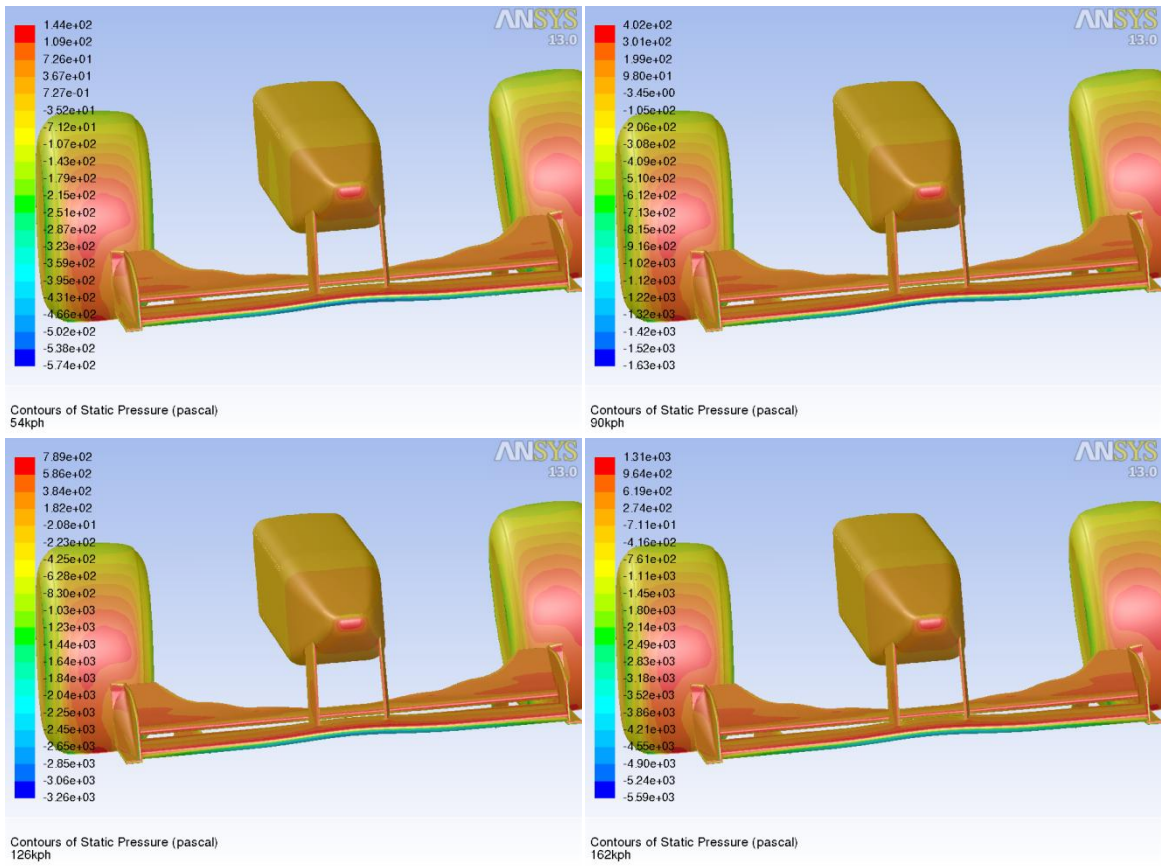


Figura 6: Andamento delle pressioni al variare delle velocità di avanzamento della vettura.

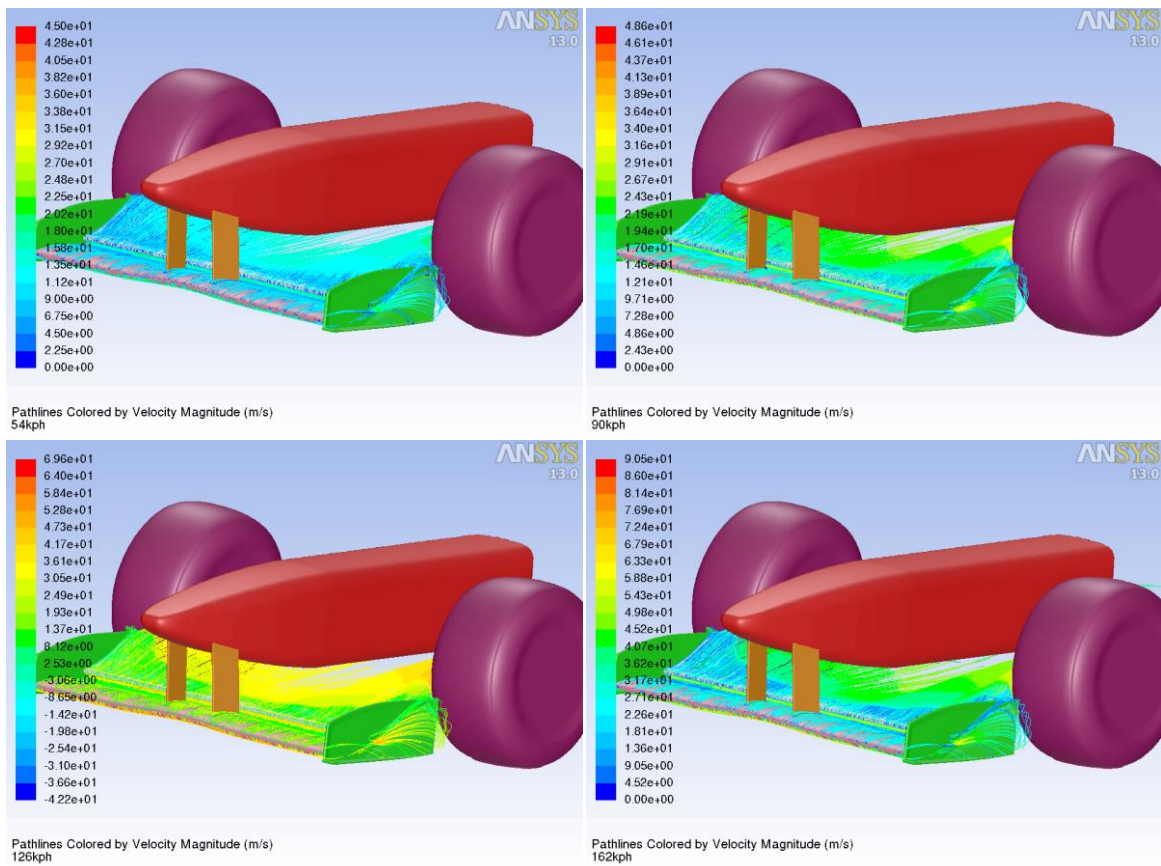


Figura 7: Andamento delle linee di flusso al variare delle velocità di avanzamento della vettura.

6. CONCLUSIONI

Nella presente memoria è stata presentata l'implementazione industriale di un metodo per il calcolo accoppiato fluido struttura basato sull'uso di tre software commerciali: il solutore FEM **NX Nastran**, il solutore CFD **ANSYS Fluent** e l'add-on di *mesh morphing* per il **Fluent RBF Morph**. L'approccio proposto dimostra come sia possibile incorporare la flessibilità della struttura direttamente all'interno del solutore CFD mediante il trasferimento dei modi. L'esempio applicativo ha dimostrato che per la particolare applicazione non è possibile trascurare l'effetto della deformabilità visto che si osserva un importante effetto sulla soluzione e sui carichi aerodinamici; ha inoltre dimostrato come sia possibile sfruttare il modello CFD "elastico" estendendo l'applicazione ad una variazione della velocità di avanzamento della vettura.

È importante notare poi che anche se i calcoli sono stati svolti su una griglia di dimensioni molto contenute (circa 3 milioni di celle), si prevedono prestazioni molto simili lavorando su modelli in scala industriale (tipicamente > 100 milioni di celle) usando risorse di calcolo adeguate. Tale affermazione è basata sul fatto che in base all'esperienza industriale nel campo delle ottimizzazioni di forma, **RBF Morph** e **Fluent** sono in grado di scalare in parallelo su *mesh* di grandissime dimensioni.

Per quanto riguarda l'accoppiamento completo in regime transitorio sono già stati completati con successo dei test sulla geometria semplice di una trave tridimensionale immersa in un flusso che hanno dimostrato come il metodo possa essere utilizzato in transitorio considerando l'effetto di inerzia e smorzamento; in questo caso si aggiorna la forma della *mesh* e delle coordinate modali ad ogni passo temporale CFD (accoppiamento debole). L'integrazione delle coordinate modali risulta agevole visto che il singolo modo viene trattato come un sistema ad un grado di libertà a condizioni iniziali note e soggetto ad una forza costante (nel passo di calcolo) per il quale esiste una soluzione analitica che si è dimostrata stabile anche con passi di calcolo molto alti.

BIBLIOGRAFIA

- [1] R. Baudille, M.E. Biancolini, "Dynamic analysis of a two stroke engine reed valve", XXXI AIAS Conference, Parma, Italy, (2002).
- [2] Battistoni M., Grimaldi C. N., Baudille R, Fiaccavento M. and Marcacci M., "Development of a Model for the Simulation of a Reed Valve Based Secondary Air Injection System for SI Engines", SAE Paper 2005-01-0224 – Proceedings of the 2005 SAE World Congress, April 11-14, 2005, Detroit, USA, edited by SAE International, Warrendale, PA, USA (2005).
- [3] R. Baudille, M. E. Biancolini, "FSI Makes FLUENT More Flexible", Fluent News VOL XIV – Spring 2005 Published by Fluent Inc 10 Cavendish Court Lebanon, NH 03766 USA (2005).
- [4] R. Baudille, M. E. Biancolini, "Modelling FSI problems in FLUENT: a dedicated approach by means of UDF programming", Proceedings of the European Automotive CFD Conference, Frankfurt, Germany (2005).
- [5] M. E. Biancolini, R. Baudille, "Modelling FSI Problems in FLUENT: a General Purpose Approach by Means of UDF Programming", Congresso FISITA 2006 F2006M235 (2006).
- [6] Baudille, M. E. Biancolini, "A general approach for studying the motion of a cantilever beam interacting with a 2D fluid flow" Interaction and Multiscale Mechanics, Vol. 1, No. 4 000-000 1 (2008).
- [7] A. Angeletti, M.E. Biancolini, E. Costa, M. Urbinati, "Optimisation of reed valves dynamics by means of Fluid Structure Interaction", European Automotive Simulation Conference (EASC), 6-7 July 2009, Munich, Germany (2009).
- [8] A. Masud, M. Bhanabhagwanwala, R.A. Khurram, An adaptive mesh rezoning scheme for moving boundary flows and fluid–structure interaction Computers and Fluids Volume: 36, Issue: 1, January, 2007, pp. 77-91 (2007).
- [9] F. Bos, Moving and deforming meshes for flapping flight at low Reynolds numbers. Retrieved 28/2/2011 from <http://www.openfoamworkshop.org/08/presentations/Mesh/frankBos.pdf> (2008)
- [10] A. de Boer, M.S. van der Schoot & H. Bijl, Mesh deformation based on radial basis function interpolation, Computers and Structures Volume: 85, Issue: 11-14, June - July, 2007, pp. 784-795 (2007).

- [11] S. Jakobsson, O. Amoignon, Mesh deformation using radial basis functions for gradient based aerodynamic shape optimization, *Computers and Fluids* Volume: 36, Issue: 6, July, 2007, pp. 1119-1136 (2007).
- [12] RBF Morph Web Portal. RBF Web Portal – home page. Retrieved 28/2/2011 from <http://www.rbf-morph.com/> (2009).
- [13] M.E. Biancolini, C. Biancolini, E. Costa, D. Gattamelata, P.P. Valentini, Industrial Application of the Meshless Morpher RBF Morph to a Motorbike Windshield Optimisation, *European Automotive Simulation Conference (EASC)* 6-7 July 2009, Munich, Germany (2009).
- [14] M.E. Biancolini, Mesh Morphing Accelerates Design Optimization ANSYS Advantage - Volume IV, Issue 1, (2010).
- [15] M.E. Biancolini, Mesh morphing and smoothing by means of Radial Basis Functions (RBF): a practical example using Fluent and RBF Morph, *Handbook of Research on Computational Science and Engineering: Theory and Practice* (in press) (2011).
- [16] M.E. Biancolini, U. Cella, “An advanced RBF Morph application: coupled CFD-CSM Aeroelastic Analysis of a Full Aircraft Model and Comparison to Experimental Data”, *Proceedings of the 8th MIRA International Vehicle Aerodynamics Conference*, 13-14 October 2010, Oxford, UK (2010).
- [17] S. Keye, “Fluid-structure coupled analysis of a transport aircraft and comparison to flight data”, *39th AIAA Fluid Dynamics Conference AIAA-2009-4198* (2009).