



TOR VERGATA
UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI ROMA



Analisi Aeroelastica di una Vettura da Competizione

Relatore:

Marco E. Biancolini

Correlatore:

Andrea Lopez

Candidato:

Luca Carnevale



Aeroelasticità

"l'aeroelasticità è lo studio della mutua interazione tra le forze inerziali, elastiche e aerodinamiche agenti in un solido esposto ad una corrente fluida e dell'influenza di tale studio sul progetto della struttura"

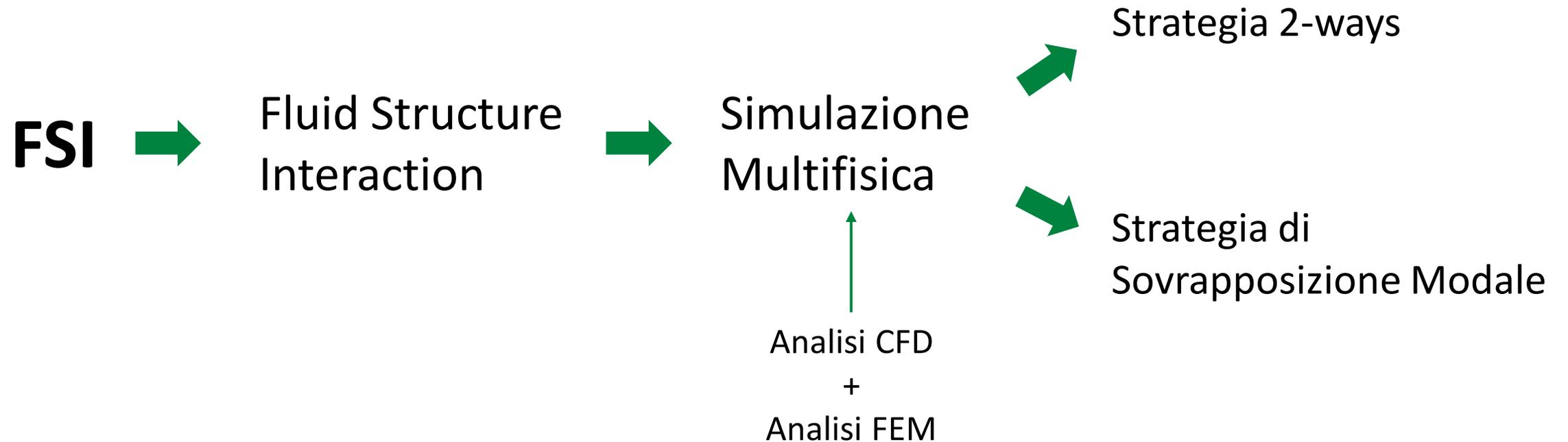
-Collar, 1947-

Statici:

- Divergenza torsionale

Dinamici:

- Distacco dei vortici
- Galloping
- Flutter





FSI



Sicurezza

Garantire l'integrità strutturale nonostante un peso ridotto

Omologazione

Deformazione strutturale all'interno dei limiti

Degradazione del materiale

I cicli di deformazione possono causare degradazione delle proprietà del materiale

Miglioramento delle prestazioni

Migliorare le prestazioni aerodinamiche guidando le deformazioni



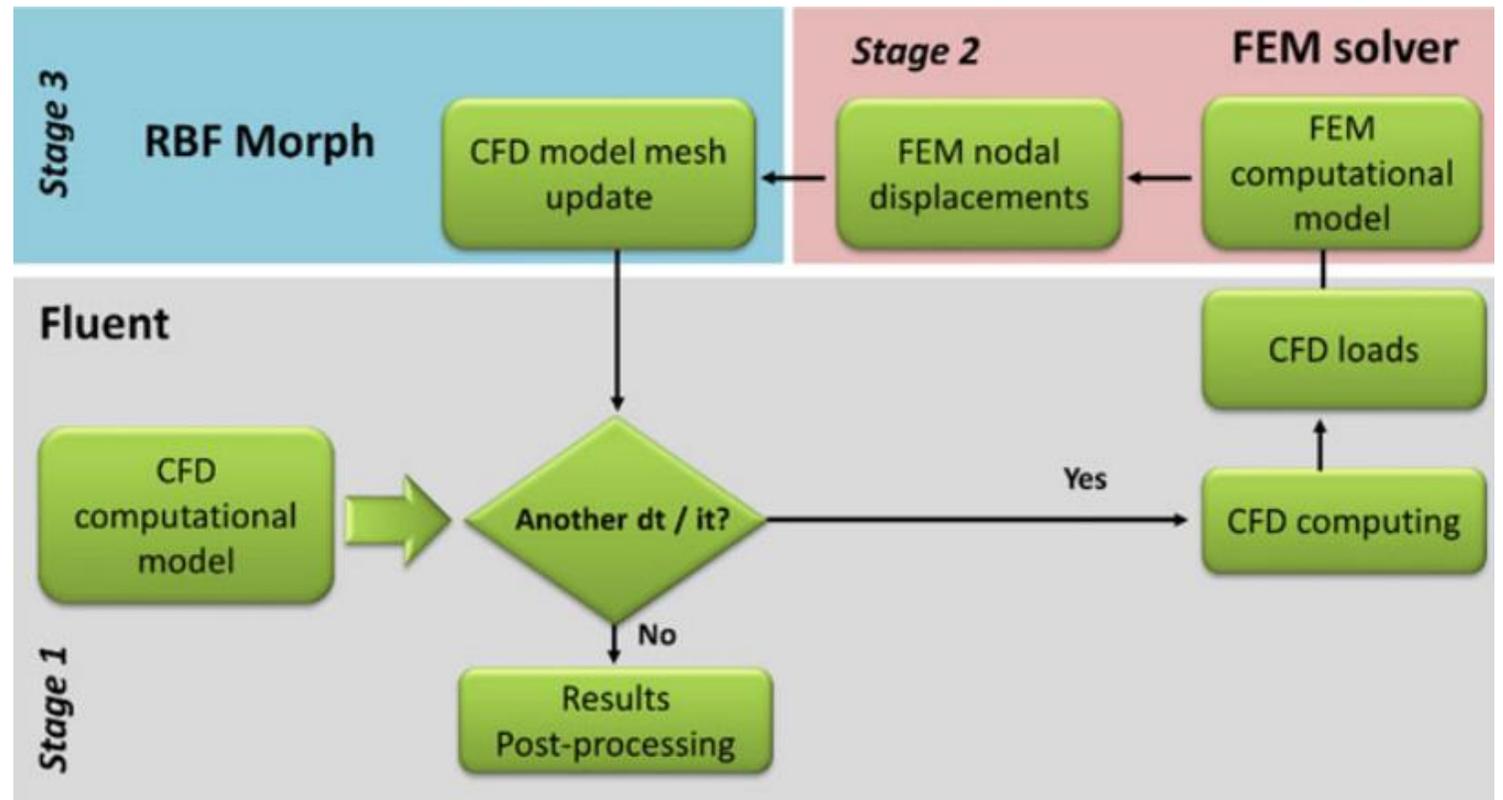
Strategia 2-ways

- Stage 1: Analisi CFD con Fluent
- Stage 2: Analisi FEM con NX NASTRAN
- Stage 3: Morphing con RBF Morph



Problematiche:

- Esportazione delle pressioni
- Deformazione della Mesh CFD



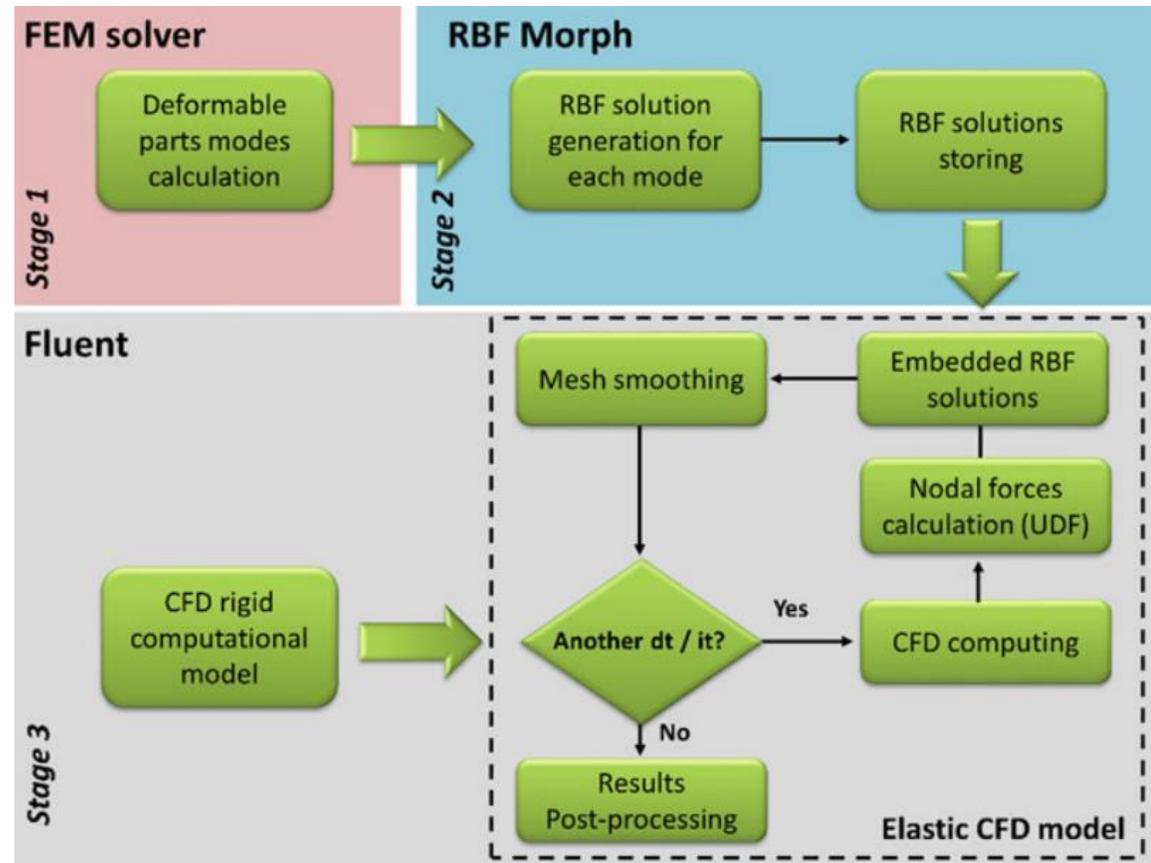
Strategia Sovrapposizione Modale

- Stage 1: Analisi FEM con NX NASTRAN
- Stage 2: Morphing con RBF Morph
- Stage 3: Analisi CFD con Fluent



Problematiche:

- Deformazione della Mesh CFD





Confronto

Strategia 2-ways

Vantaggi:

- Elevata precisione
- Limitato solo dalle caratteristiche del risolutore

Limiti:

- Complessità del Setup
- Computazionalmente più complesso

Strategia di Sovrapposizione Modale

Vantaggi:

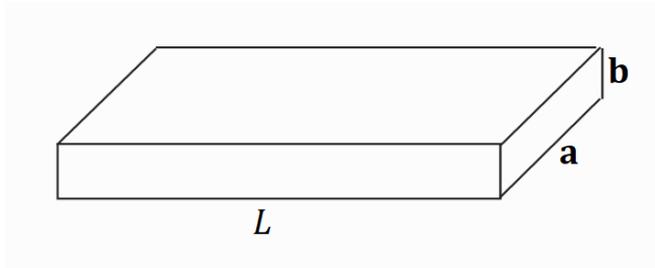
- Più semplice numericamente
- Maggiore robustezza
- Adattamento della mesh durante il calcolo

Limiti:

- Solo problemi lineari
- Necessaria una qualificazione della base modale per i nuovi casi



Verifica Equivalenza delle Strategie



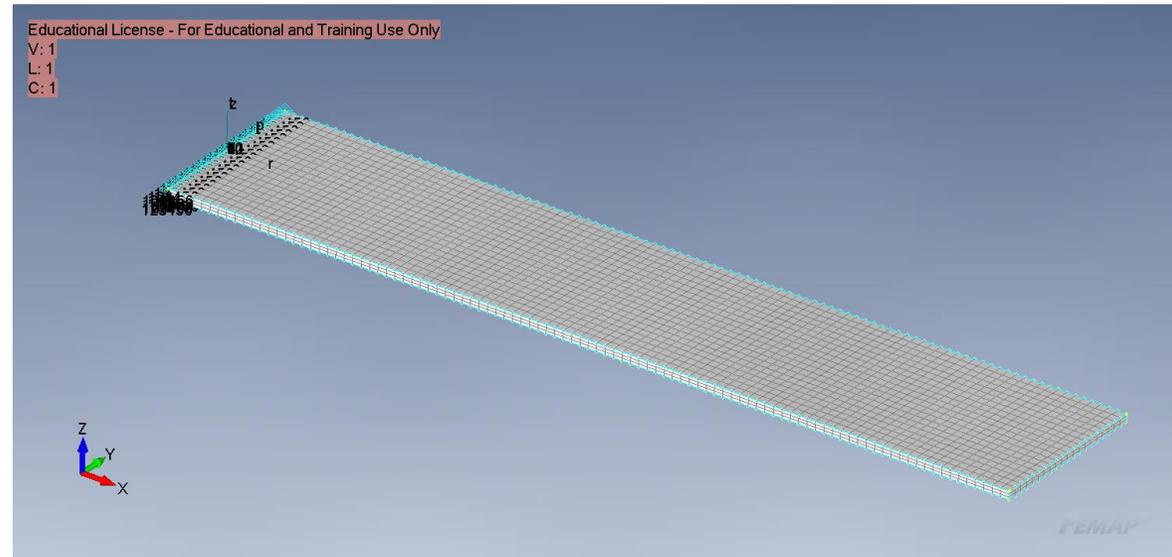
Proprietà:

- $L \times a \times b = 1 \text{ m} \times 0,2 \text{ m} \times 0,01$
- Materiale Alluminio
- Carico:
 - Trave 2D: $q = 52.974 \frac{N}{m}$
 - Trave 3D: $p = 236,87 \text{ Pa}$

↓
Modello Semplice

↓
Trave Incastrata

- Modello 2D
- Modello 3D
- Studio FSI



Modello 2D:
 Soluzione statica
 Soluzione analitica

Soluzione con Linea Elastica
Modello di Eulero-Bernoulli



Equazioni al 4° ordine:
$$\begin{cases} EAw'' = -p \\ EI_x v^{(4)} = q \end{cases}$$

Condizioni al contorno:

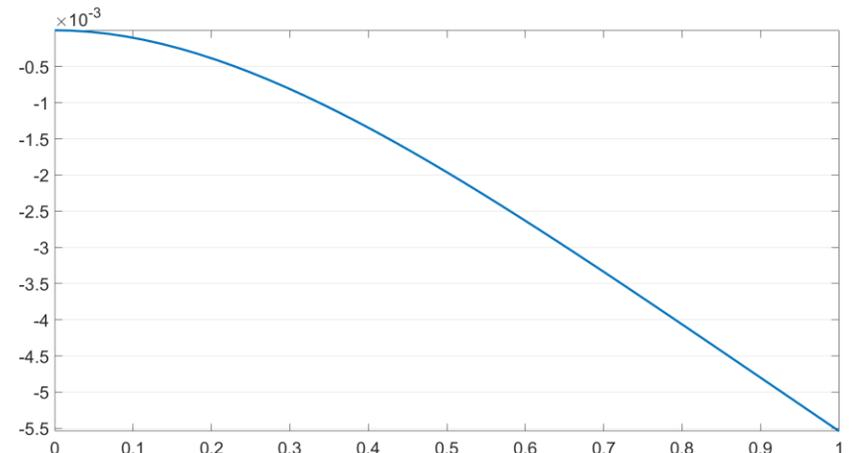
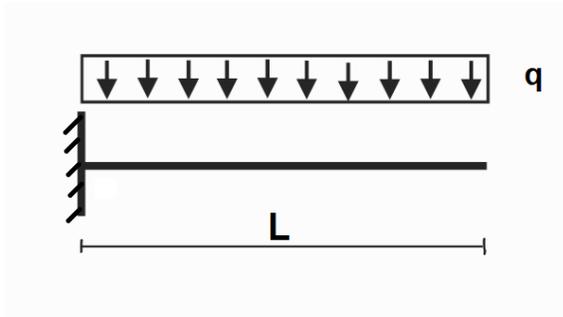
- $v(0) = 0$
- $v'(0) = 0$
- $M(L) = 0$
- $T(L) = 0$



$$v(x) = -\frac{qx^2}{24EI} (6L^2 - 4Lx + x^2)$$

HP:

- Problema Piano
- Materiale Elastico, Lineare, Isotropo e Omogeneo
- Sezioni Rette rimangono Rette
- Piccoli spostamenti





Modello 2D:

$$-\frac{\partial^2}{\partial x^2} \left[EI(x) \frac{\partial^2 y(x,t)}{\partial x^2} \right] + f(x,t) = m(x) \frac{\partial^2 y(x,t)}{\partial t^2}$$



Vibrazioni libere: $f(x,t) = 0$

$$y(x,t) = Y(x)T(t)$$

$$\cos(\beta l) \cosh(\beta l) + 1 = 0$$

$$\omega_n = (\beta l)_n^2 \sqrt{\frac{EI}{ml^4}}$$



deformazione

$$y(x,t) = \sum_{n=1}^{\infty} Y_n(x) T_n$$

Con

$$T_n = \frac{q}{\omega_n^2} * \int_0^l Y_n(x) dx$$

Peso modale

Condizioni al Contorno

- $Y(0) = 0$
- $\frac{dY}{dx} \Big|_{x=0} = 0$
- $\frac{d^2Y}{dx^2} \Big|_{x=l} = 0$
- $\frac{d^3Y}{dx^3} \Big|_{x=l} = 0$
- Deformazione istantanea ($T''(t) = 0$)

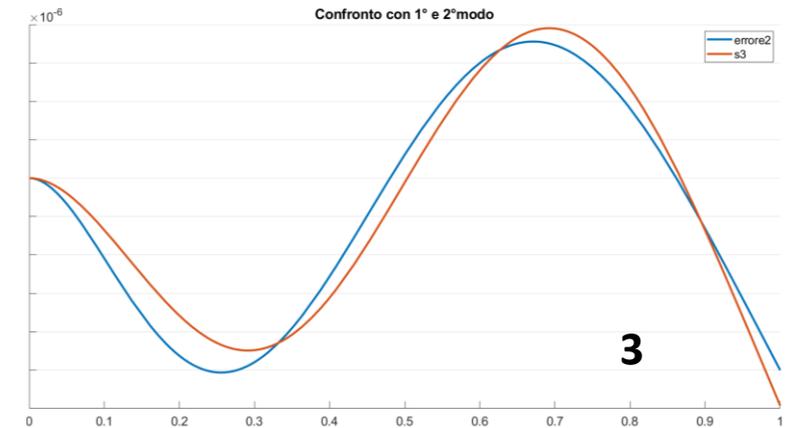
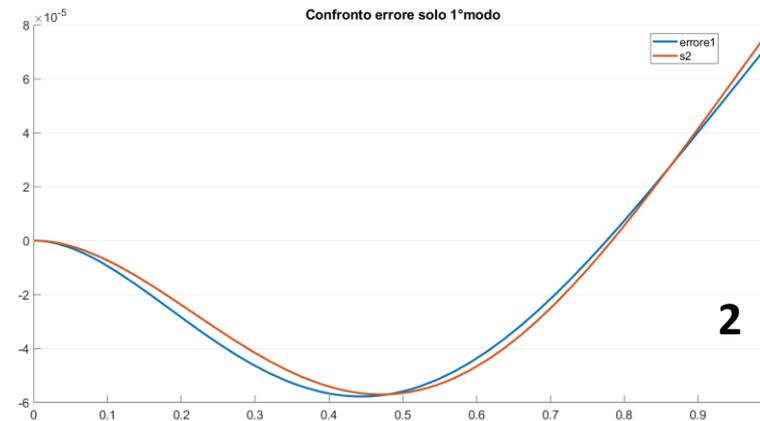
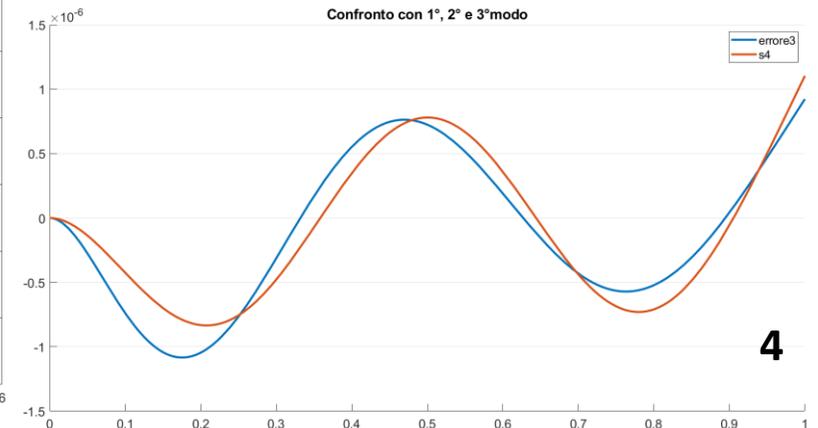
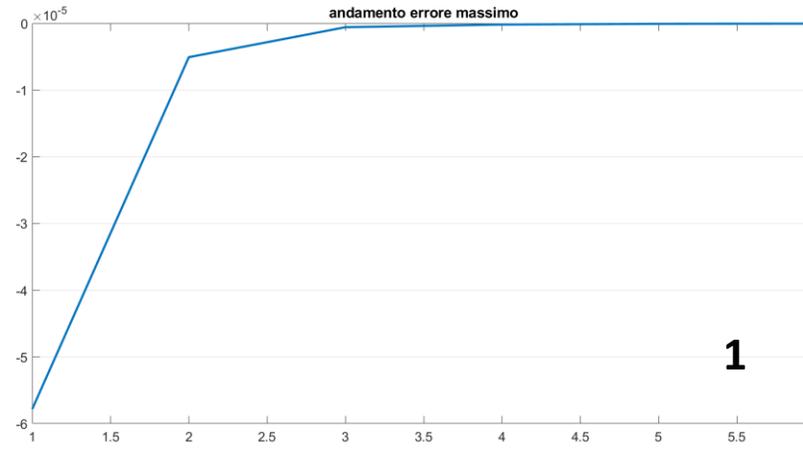




Modello 2D: CONFRONTO RISULTATI

Spostamento al tip con soluzione statica = 5,541 mm

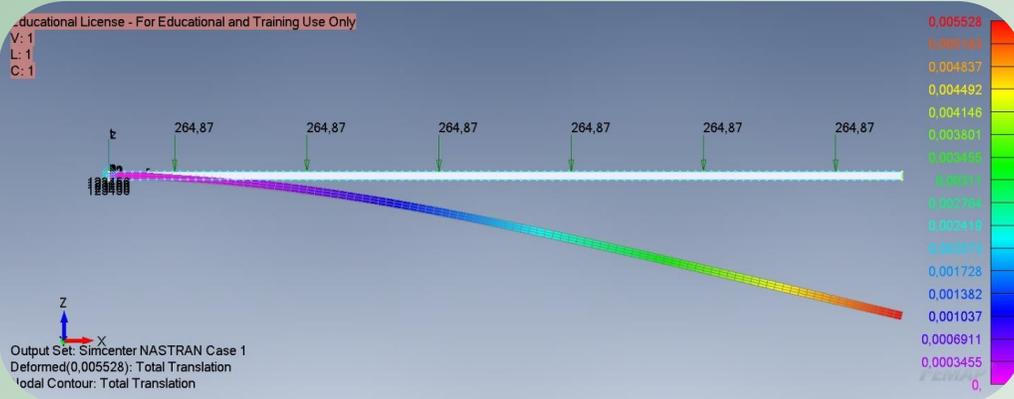
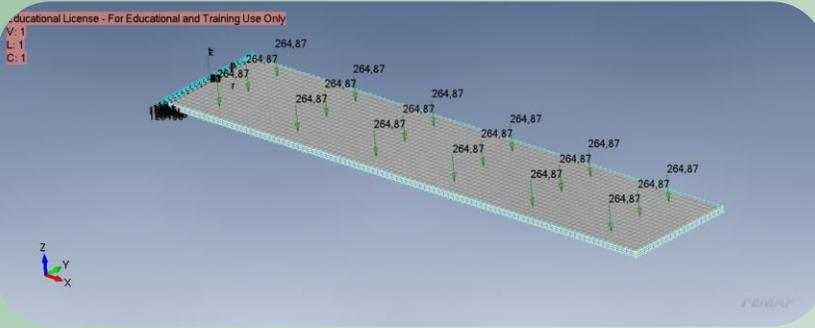
modi considerati:	errore % rispetto la sol. statica
dal 1° al 6°	3.3363e-04
dal 1° al 5°	0.0024
dal 1° al 4°	-0.0033
dal 1° al 3°	0.0167
dal 1° al 2°	-0.0903
solo il 1°	1.3397





Modello 3D

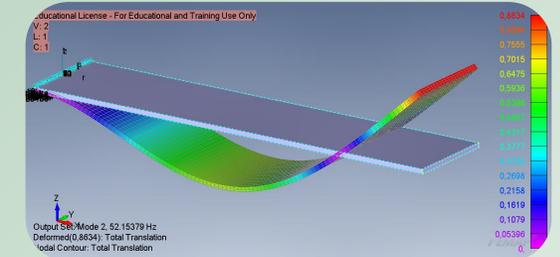
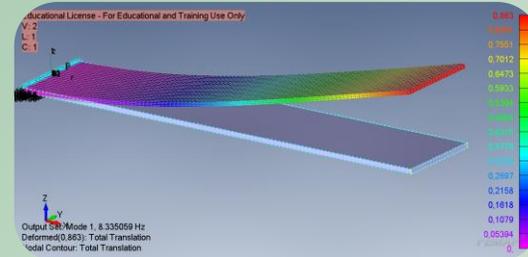
SOLUZIONE FEM



SOVRAPPOSIZIONE MODALE

$$[M]\{\ddot{X}\} + [C]\{\dot{X}\} + [K]\{X\} = \{f(t)\}$$

$$\{x\} = \sum_{i=1}^{\# \text{ modi}} \{X\}_i \sum_{j=1}^{\# \text{ nodi}} \frac{X_{ij} q_j}{\omega_n^2}$$

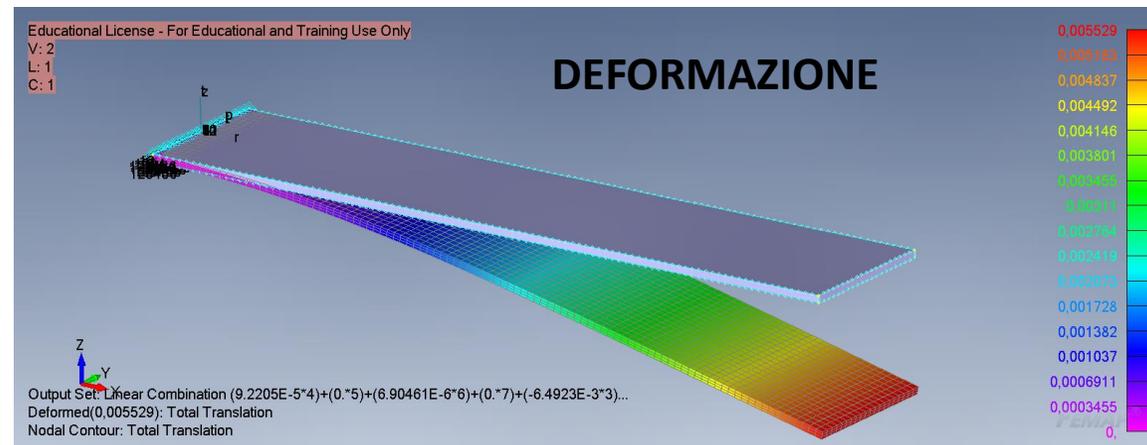
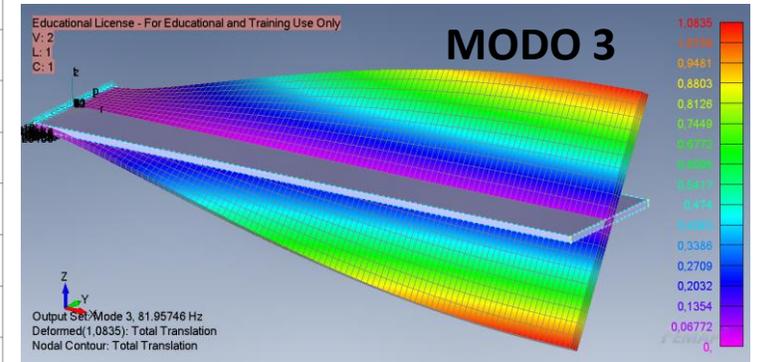
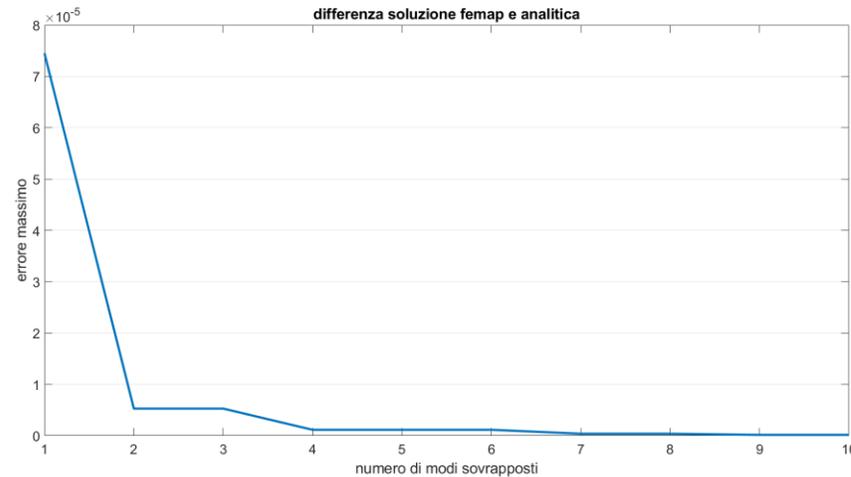




Modello 3D: CONFRONTO RISULTATI

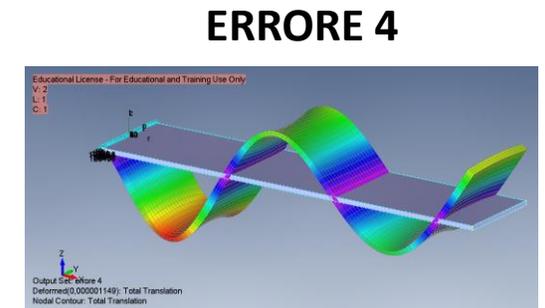
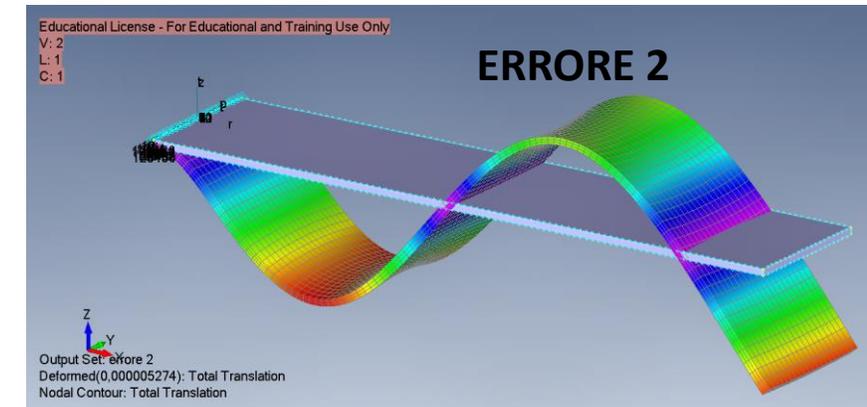
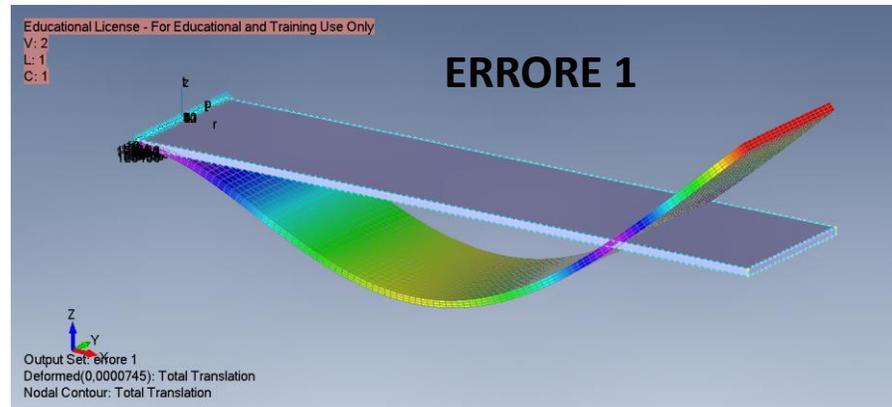
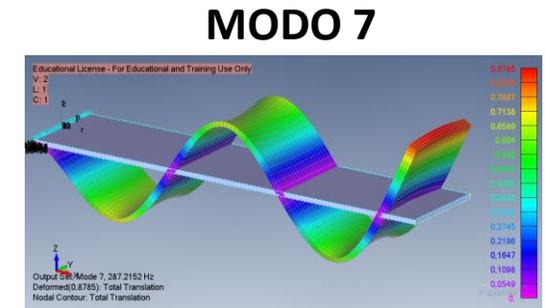
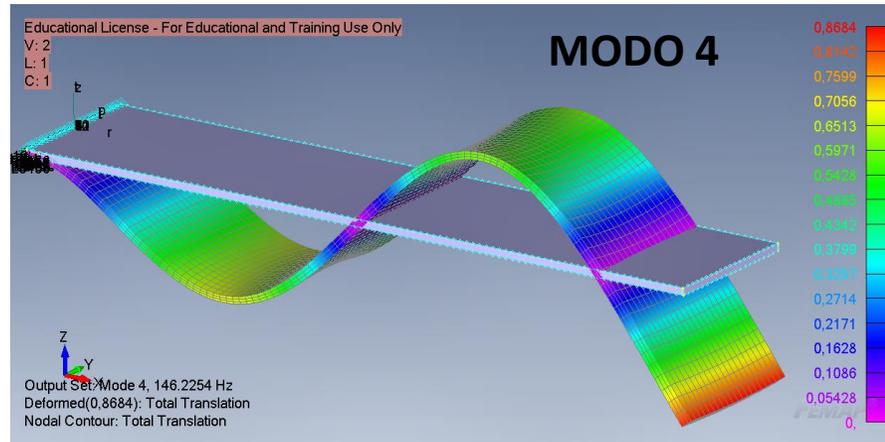
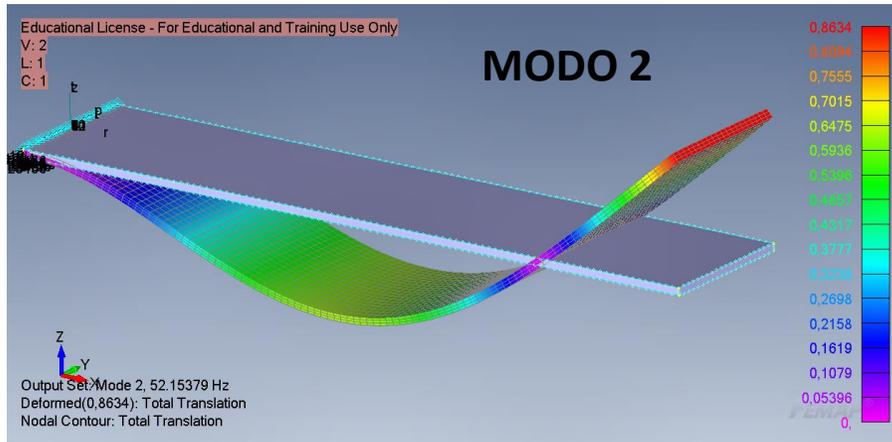
Spostamento al tip con soluzione statica = 5,528 mm

modi considerati:	errore % rispetto al FEM
solo il 1°	1.3528
dal 1° al 2°	-0.0869
dal 1° al 3°	-0.0869
dal 1° al 4°	0.0215
dal 1° al 5°	0.0215
dal 1° al 6°	0.0215
dal 1° al 7°	0.0012
dal 1° al 8°	0.0012
dal 1° al 9°	0.0071
dal 1° al 10°	0.0071





Modello 3D: CONFRONTO RISULTATI

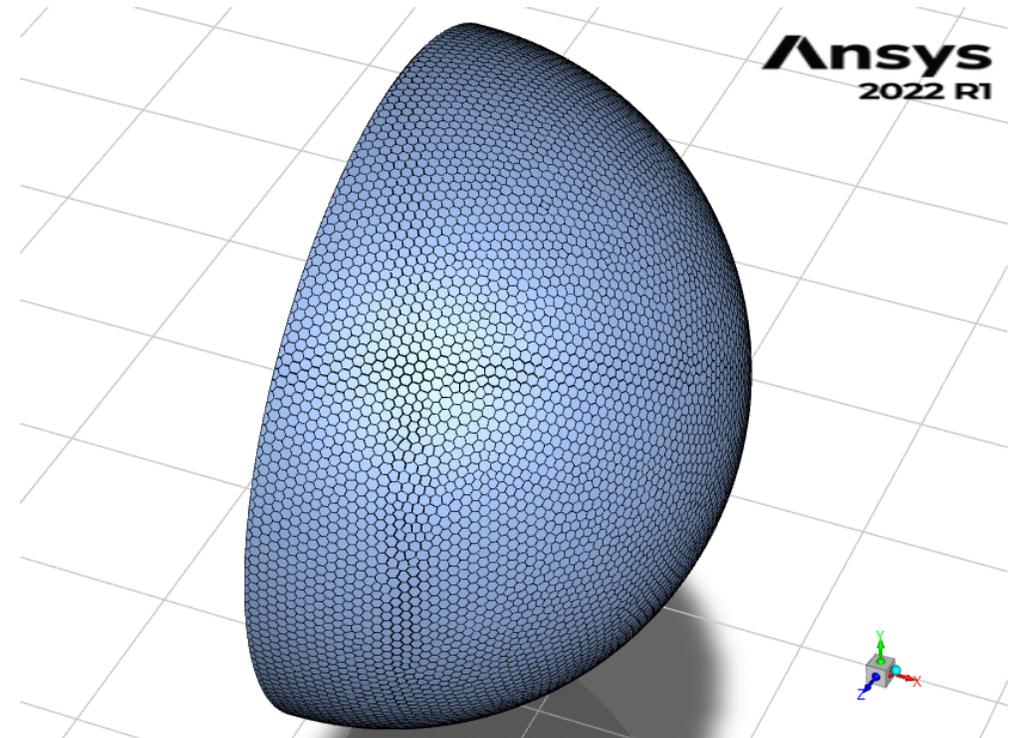
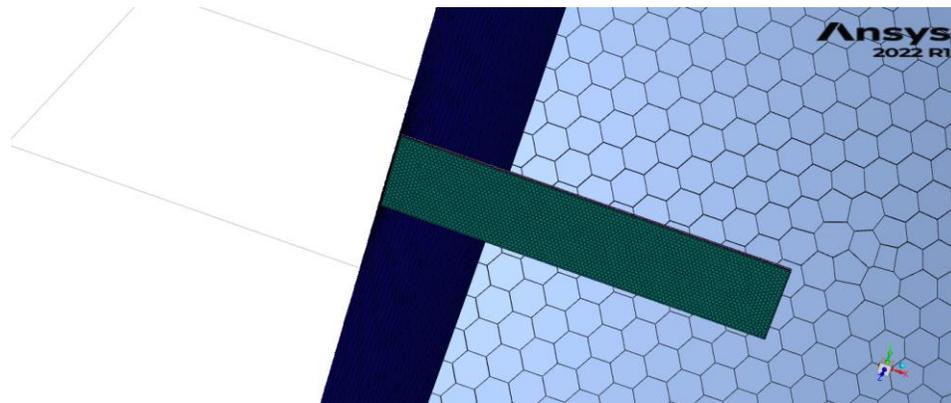




ANALISI FSI TRAVE

Caratteristiche modello CFD:

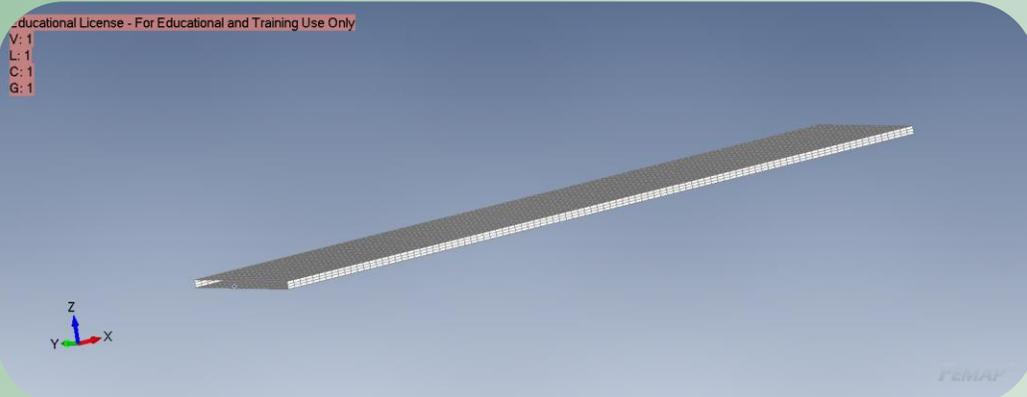
- Dominio fluido 10 volte la lunghezza della Trave
- $V=500 \text{ Km/h}$
- Angolo di attacco 20°





ANALISI FSI TRAVE

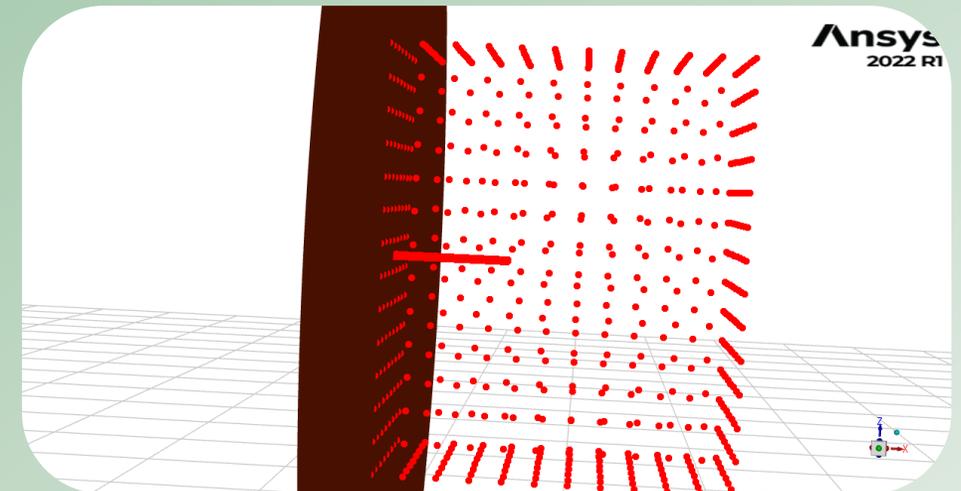
2-WAYS



Step	Δ % spostamento alla fine dello step
Step 1	-7,4 %
Step 2	0,64
Step 3	-0,053

SOVRAPPOSIZIONE MODALE

- Analisi Modale
- Import dei modi con RBF Morph
- Un'unica analisi CFD

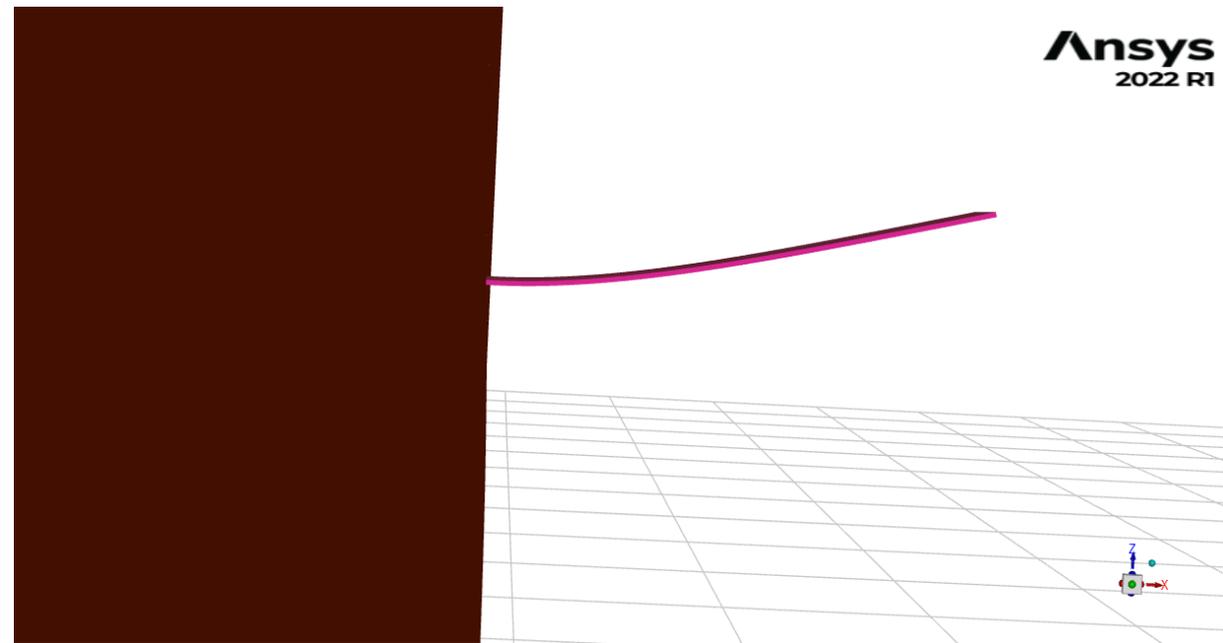




Modello 3D: CONFRONTO RISULTATI

	Spostamento al tip
2-Ways	18,85 cm
Sovrapposizione modale	18,95 cm
Differenza % tra i due metodi	-0,53 %

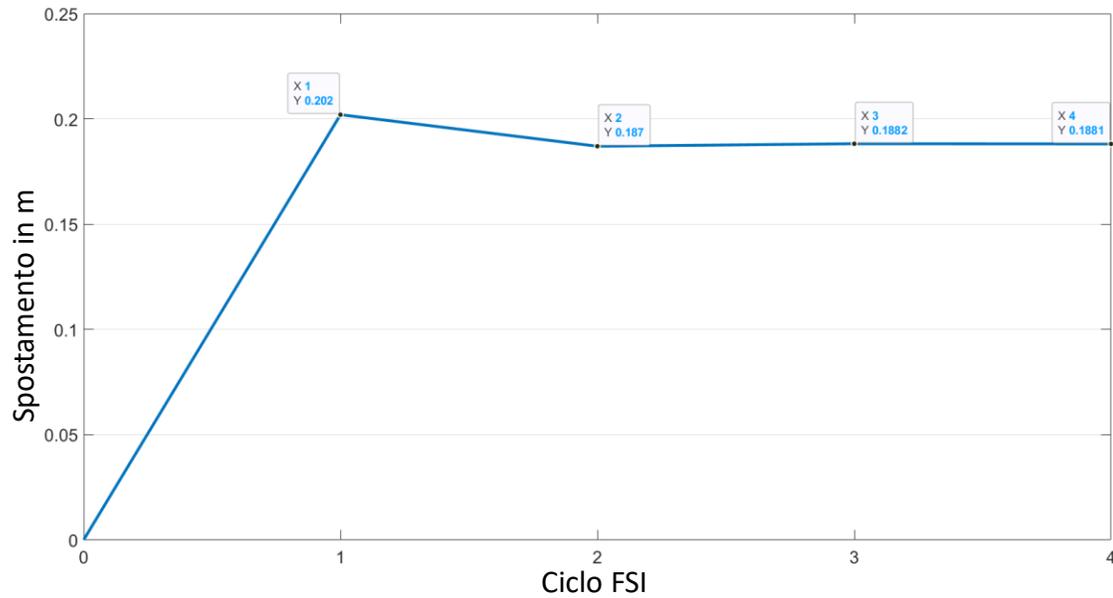
	Valore iniziale	Valore finale	Variazione %
c_d	0,00157	0,0035749	127 %
c_l	0,40441	0,394225	-2,5 %





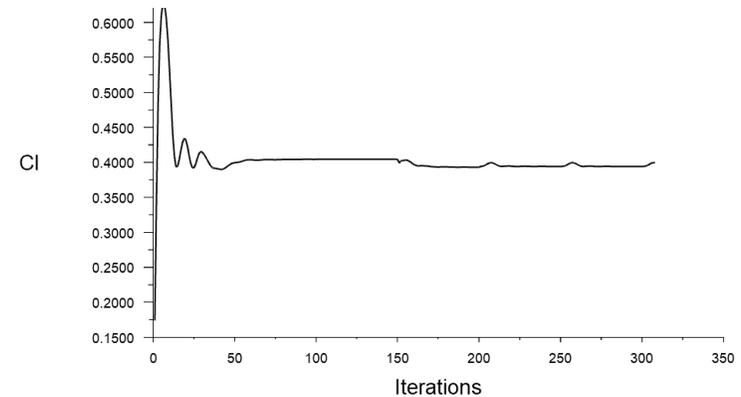
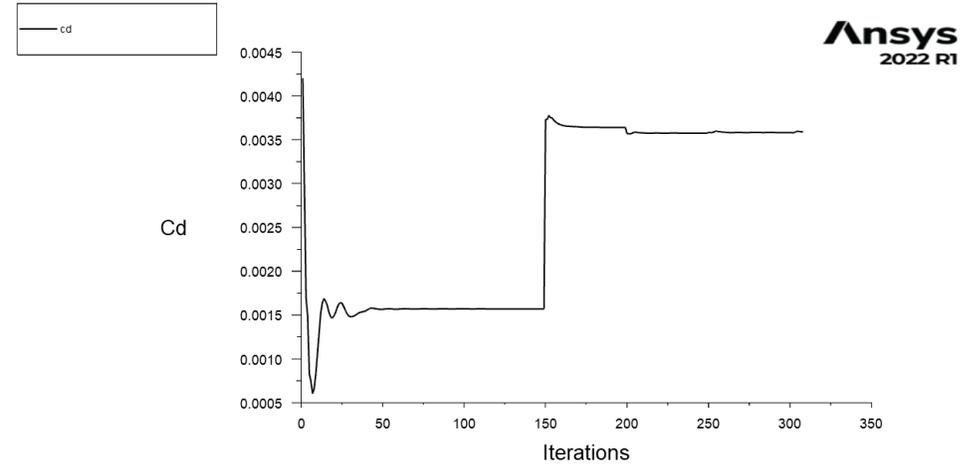
Modello 3D: CONFRONTO RISULTATI

2-ways



Step	Δ % spostamento alla fine dello step
Step 1	-7,4 %
Step 2	0,64
Step 3	-0,053

Sovrapposizione Modale



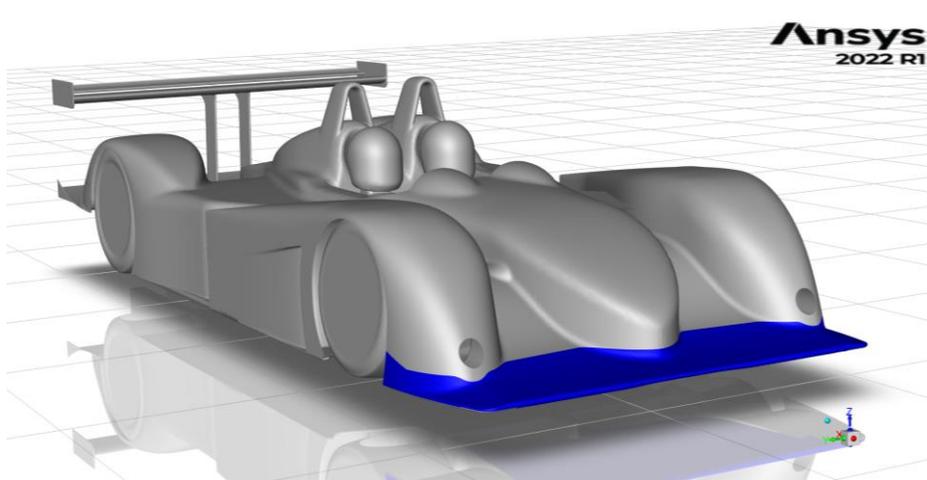
Caso Dallara

Obiettivi:

- Verifica equivalenza delle strategie
- Applicazione e confronto su due versioni della struttura: rinforzato (con spider), non rinforzato

Area di applicazione:

- Splitter

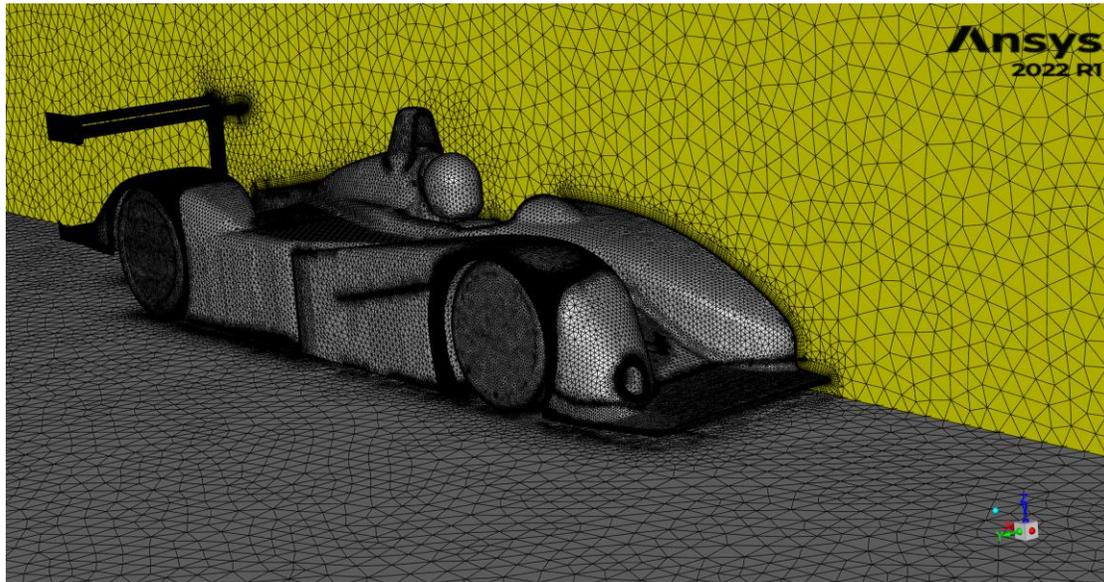


Dallara SP1



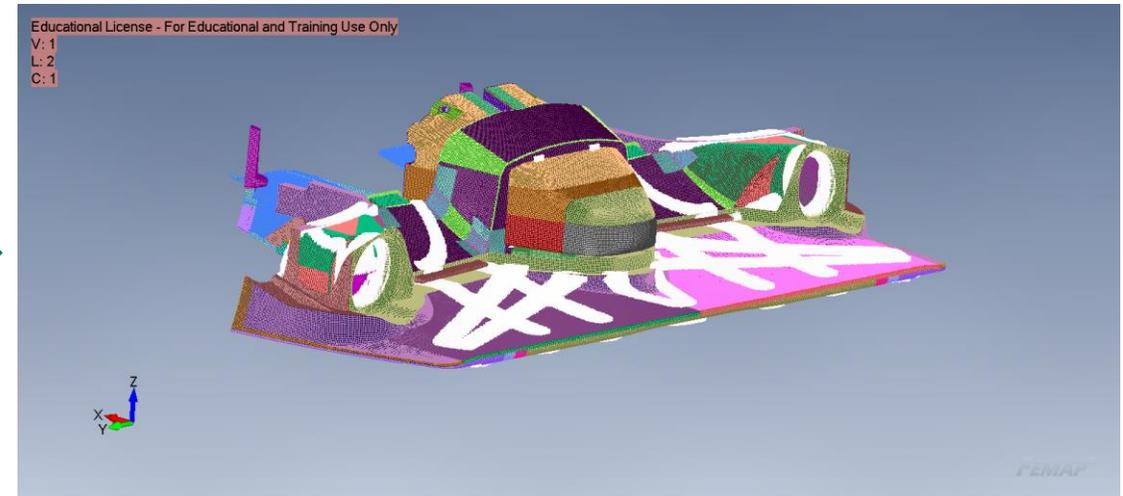
Caso Dallara: Analisi High Fidelity

CFD



- 4,76 milioni di nodi
- 13,3 milioni di celle
- Piano Symmetry

FEM

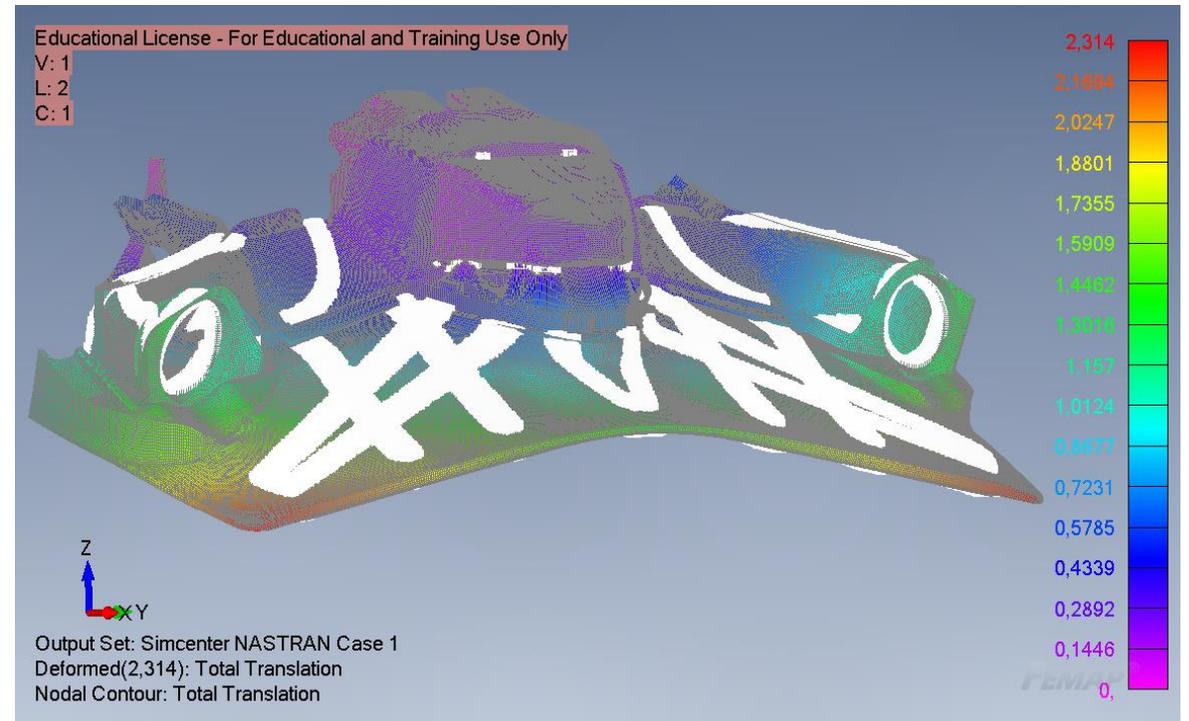


- 380 mila nodi
- 425,79 mila elementi di tipo shell
- Il modello è in mm

Caso Dallara: Verifica equivalenza metodi

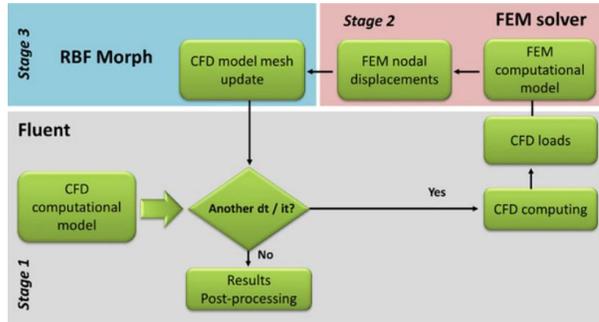
Carico Applicato 5 KN in direzione -z

	Spostamento max
Soluzione FEM	2,314 mm
Sovrapposizione Modale	2,467 mm
Differenza in mm	0,153 mm



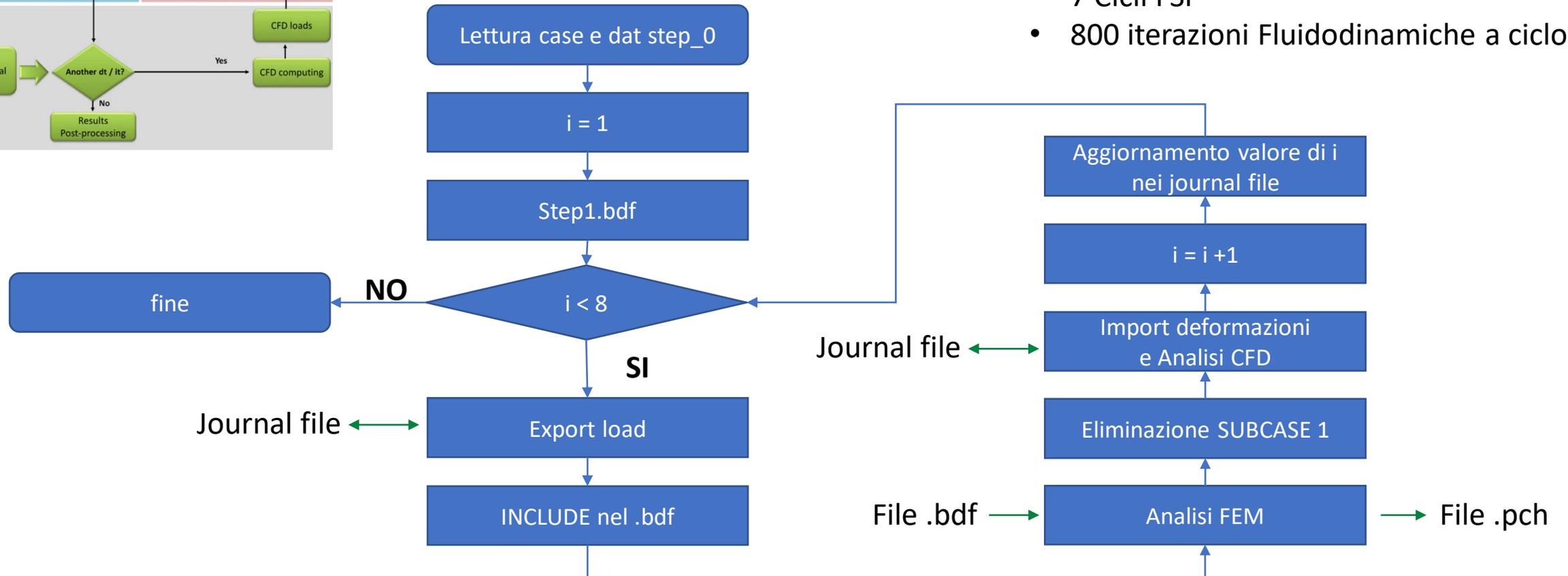


Caso Dallara: FSI 2-Ways Automazione Python



Info generali

- 7 Cicli FSI
- 800 iterazioni Fluidodinamiche a ciclo





Caso Dallara: FSI 2-Ways Export

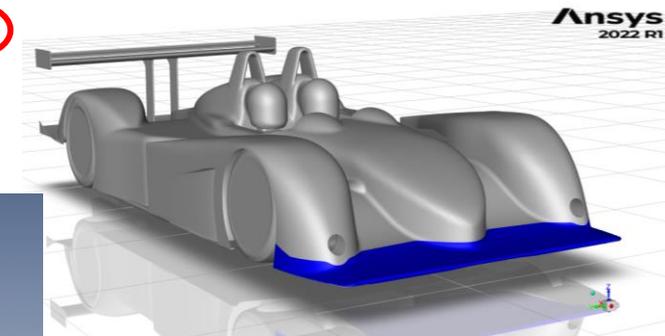
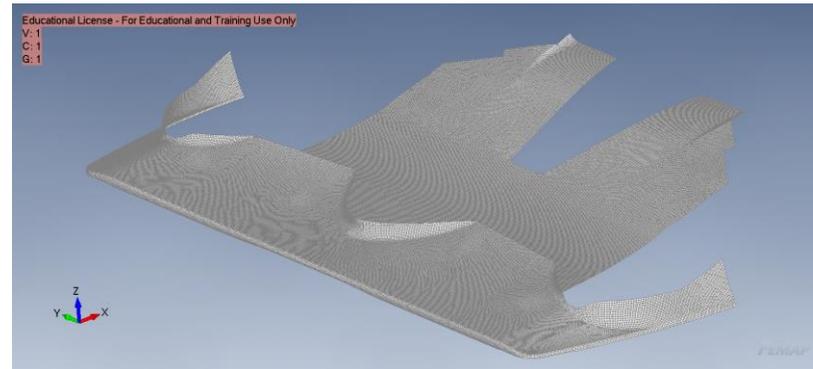
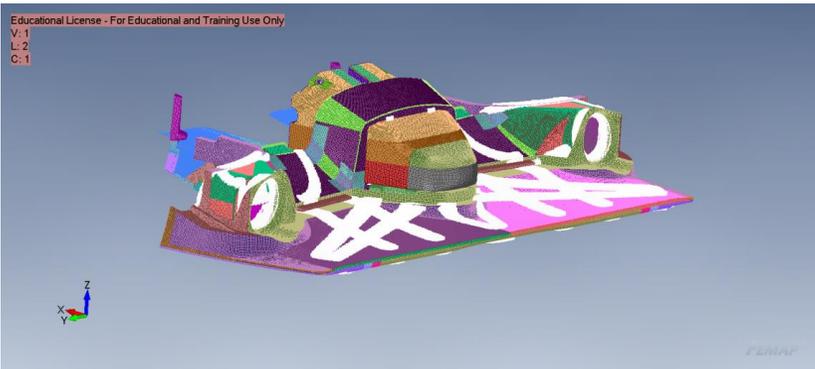
```
1 (define i 1)
2 ;; Loading .cas e .dat files
3 /file/read-case step_0.cas.h5
4 (ti-menu-load-string (format #f "/file/read-data step_~a.dat.h5" (- i 1)))
5 file/fsi/read-fsi-mesh mapping_fem_interface.bdf nastran mm no ;; Reading Nastran mesh
6 (ti-menu-load-string (format #f "file/fsi/write-fsi-mesh no load~a.bdf nastran fem_interface () pressure yes" i))
7
8 exit
```

La riga numero 1 assegna il valore alla variabile i, durante il ciclo viene aggiornato il numero cerchiato in rosso

La riga 4 legge l'output della simulazione CFD dello step precedente (- i 1)

La riga 5 legge la superficie di mapping specificando che questa è in mm

La riga 6 salva il file .bdf delle pressioni





Caso Dallara: FSI 2-Ways Modifiche file .pch e .bdf

```

1  INIT MASTER(S)
2  NASTRAN SYSTEM(442)=-1,SYSTEM(319)=1
3  ID no, FEMAP
4  SOL SESTATIC
5  CEND
6  TITLE = Simcenter Nastran Static Analysis Set
7  ECHO = NONE
8  DISPLACEMENT(PUNCH) = ALL
9  SPC = 1
10 LOAD = 1
11 SUBCASE 1
12 LABEL = LOAD IN PASCAL
13 LOAD = 1
14 SUBCOM 2
15 SUBSEQ = -0.000001
16 BEGIN BULK
17 $ *****
18 $   Written by : Femap
19 $   Version   : 2021.1.0
20 $   Translator : Simcenter Nastran
21 $   From Model : D:\TESI\capitolo 5\2_vie_no_ragno\no_ragno.modfem
22 $   Date       : Fri Feb 10 11:24:30 2023
23 $   Output To  : D:\TESI\capitolo 5\2_vie_no_ragno\
24 $ *****
25 $
26 PARAM, PRGPST, YES
27 PARAM, POST, -1
28 PARAM, OGEOM, NO
29 PARAM, AUTOSPC, YES
30 PARAM, K6ROT, 100.
31 PARAM, GRDPNT, 0
32 PARAM, NOFISR, 1
33 CORD2C      1      0      0.      0.
34 +FEMAPC1    1.      0.      1.
35 CORD2S      2      0      0.      0.
36 +FEMAPC2    1.      0.      1.
37 $ Femap Load Set 1 : NASTRAN 1
38 INCLUDE 'load1.bdf'
39 $ Femap Constraint Set 1 : vincoli
40 SPC          1  285964  123456      0.
41 SPC          1  285966  123456      0.
42 SPC          1  285967  123456      0.
43 SPC          1  285968  123456      0.
44 SPC          1  285969  123456      0.

```

La parte cerchiata in giallo serve per scalare le pressioni da Pa in MPa

La parte cerchiata in blu serve per leggere le pressioni importate, il numero di load~.bdf viene aggiornato nel ciclo for e assume i valori da 1 a 7

Spezzone del programma Python per eliminare le soluzioni del SUBCASE 1

```

52
53
54
55
56
57
58
59
60

```

```

pathn = 'step' + str(i) + '.pch'
b_file = open(pathn, "r")
lines = b_file.readlines()
b_file.close()
del lines[0:649679]
new_file = open(pathn, "w+")
for line in lines:
    new_file.write(line)
new_file.close()

```

Spezzone del programma Python per aggiornare il valore della i nei file .jou e nel Bulk Data File

```

69
70
71
72
73
74
75
76
77
78
79
80
81
82
83
84
85
86
87
88
89
90
91
92
93

```

```

# Update files for next step

file = (open("export.jou", 'r'))
lista = list(file)
lista [0] = str("(define i " + str(i+1) + ") \n")
file.close
with open("export.jou", 'w') as f:
    for u in range (8) :
        f.write(str(lista[u]))
f.close ()

file = (open("2way_dallara.jou", 'r'))
lista = list(file)
lista [1] = str("(define i " + str(i+1) + ") \n")
file.close
with open("2way_dallara.jou", 'w') as f:
    for u in range (35) :
        f.write(str(lista[u]))
f.close ()

step = str('step' + str(i+1) + '.bdf')
file = (open("step1.bdf", 'r'))
lista = list(file)
lista [37] = str("INCLUDE 'load" + str(i+1) + ".bdf'\n")
file.close

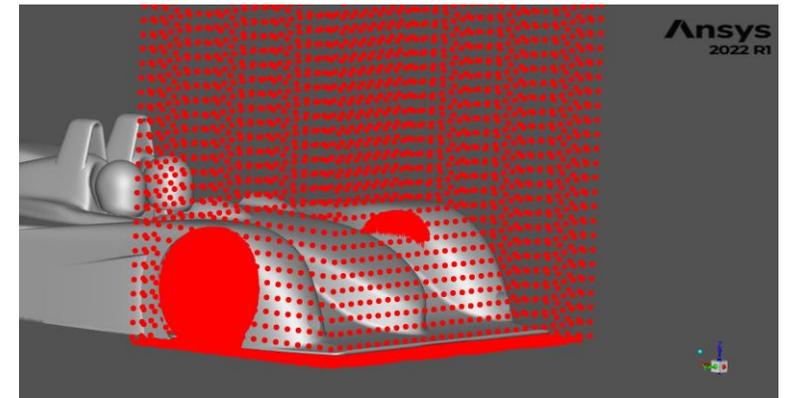
```



Caso Dallara: FSI 2-Ways Import Deformazioni e Analisi CFD

```
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)))
15 (rpsetvar 'rbf/nastran-scale-disp-factor 0.001)
16 (process-nastran (string-append "step" (number->string i)) (5 6 7 8 9 10 11 13 14 15 16 17 19 20 21) 1 0.001 0.01)
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 | 800
33 (morph-undo) ;; Morphing Undo
34 (ti-menu-load-string (format #f "wcd step_~a.cas.h5" i))
35 exit
```

Avvia RBF Morph e calcola la soluzione delle RBF per effettuare il mesh morphing. Oltre alla soluzione del FEM step.pch , legge un file chiamato base.rbf che individua il dominio della mesh che viene modificato dalla soluzione e i vincoli sugli spostamenti di alcuni nodi: ruote e strada hanno spostamento nullo

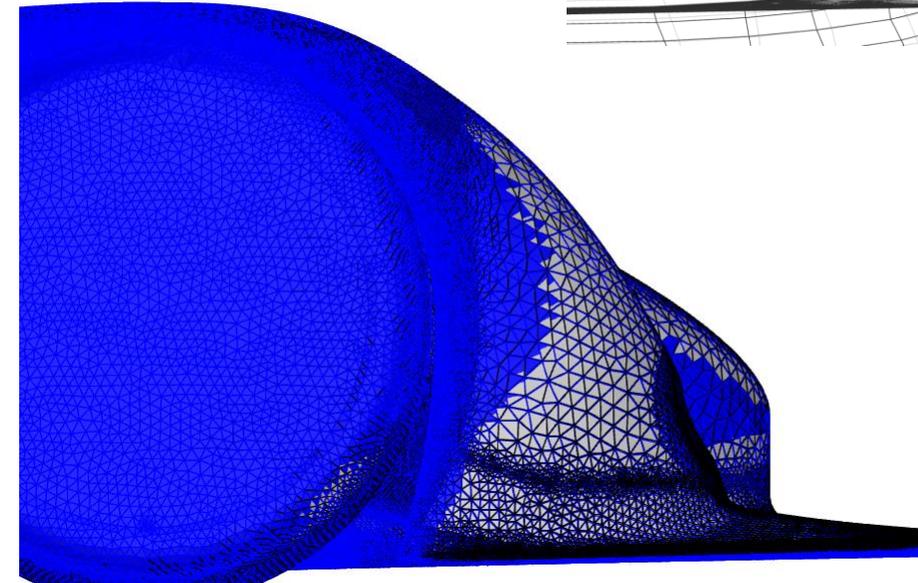
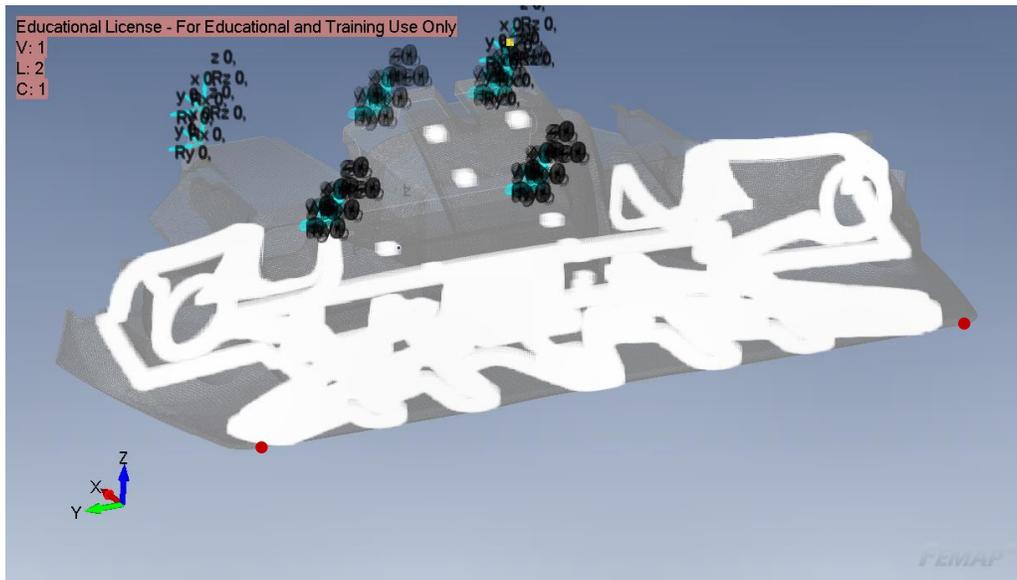
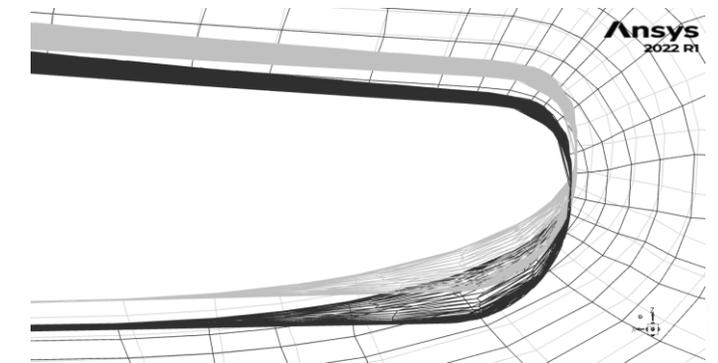




Caso Dallara: FSI Risultati con Spider

	Non deformato	2-ways	Variazione %
Spostamento max [mm]		4.24	
Drag [N]	1.71e+3	1.75e+03	2.4
Downforce splitter [N]	4.90e+03	4.81e+03	-1.84
Downforce Vettura [N]	7.19e+03	7.18e+03	-0.21

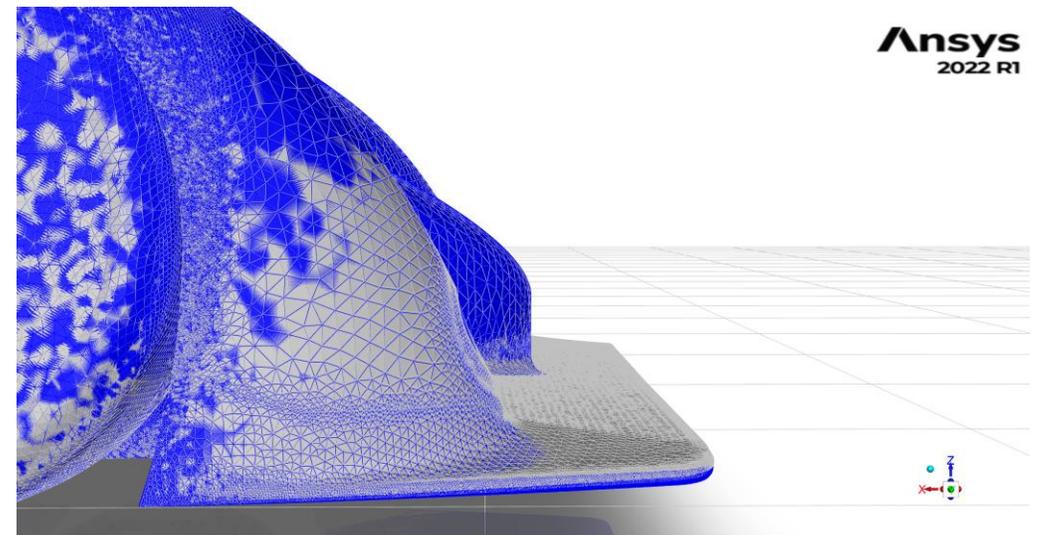
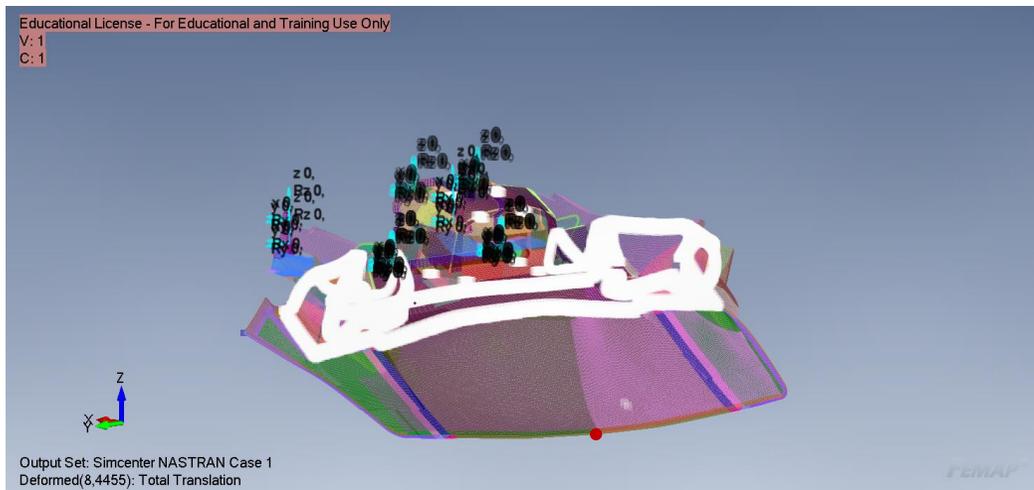
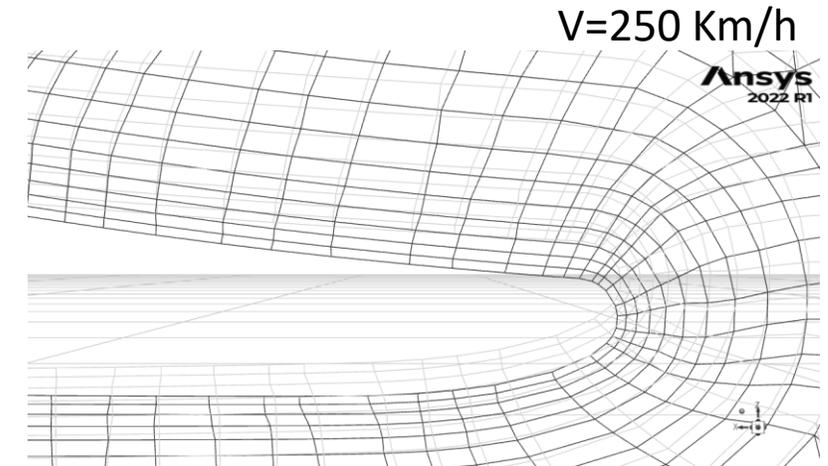
V=250 Km/h



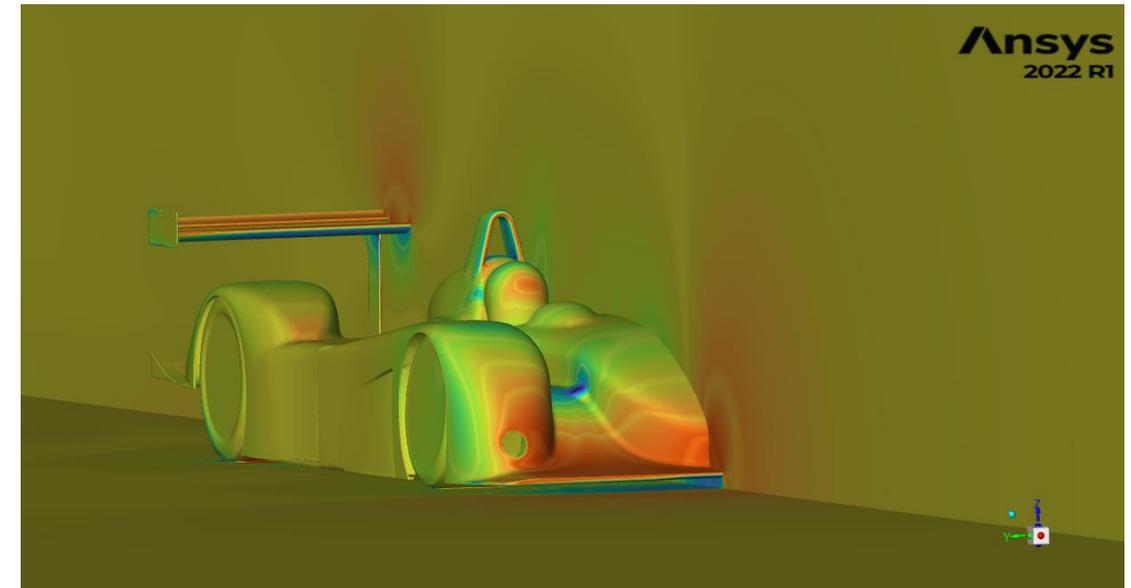
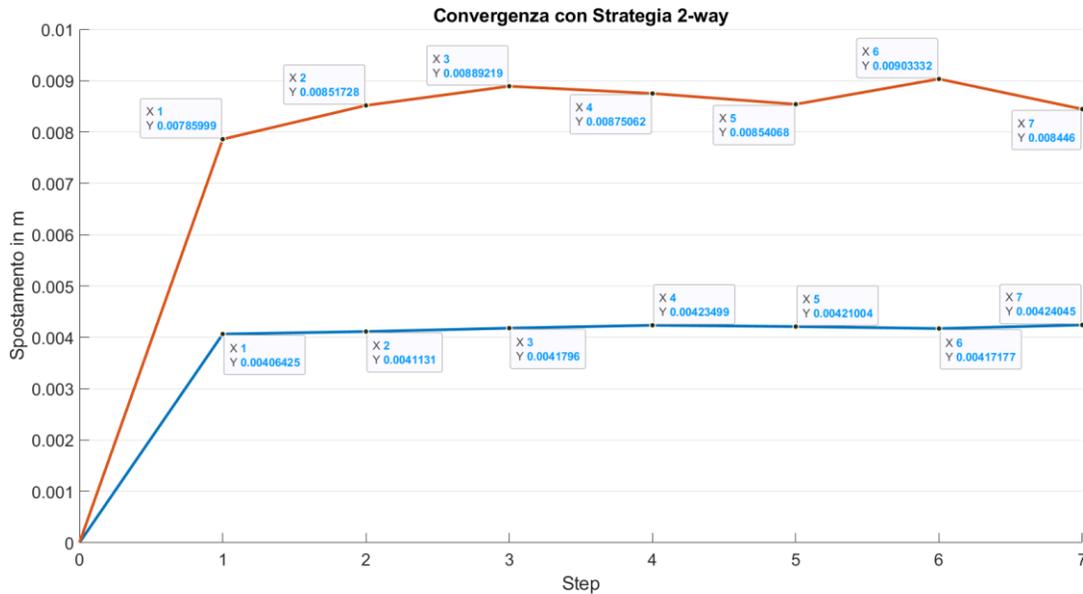


Caso Dallara: FSI Risultati senza Spider

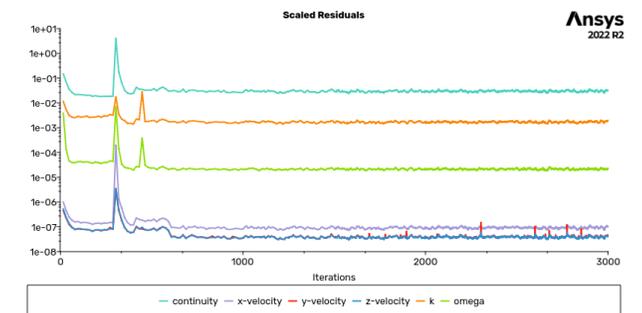
	Non deformato	2-ways	Variazione %
Spostamento max [mm]		8,44	
Drag [N]	1.71e+3	1.6693e+03	-2.3459
Downforce splitter [N]	4.90e+03	4.7518e+03	-2.9433
Downforce Vettura [N]	7.19e+03	6.8761e+03	-4.3378



Caso Dallara: FSI Confronto Risultati

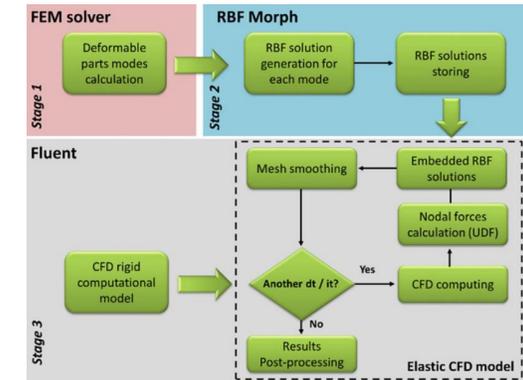
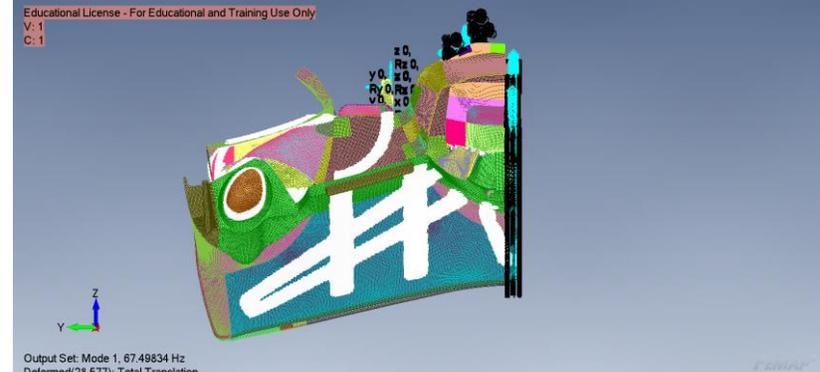
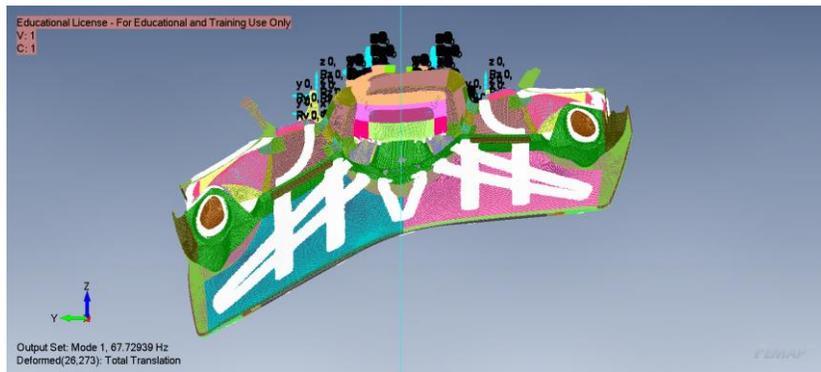


	Spostamento [mm]	Drag vettura [N]	Downforce Splitter [N]	Downforce vettura [N]
Modello Rinforzato	4,24	1,75e+03	4,80e+03	7,2e+03
Modello Senza Spider	8,44	1,6693e+03	4,75e+03	6,88e+03
Differenza %	99,17	-4,6	-1,12	-4,35



Caso Dallara: FSI Sovrapposizione Modale

I modi dello splitter non sono simmetrici rispetto al piano medio per effettuare l'analisi con sovrapposizione modale è stato necessario tagliare lo splitter e imporre nuovi vincoli



Modello in millimetri

$$\text{deformazioni} \cdot \frac{1}{\sqrt{1000}}$$

Ansys Fluent utilizza i metri

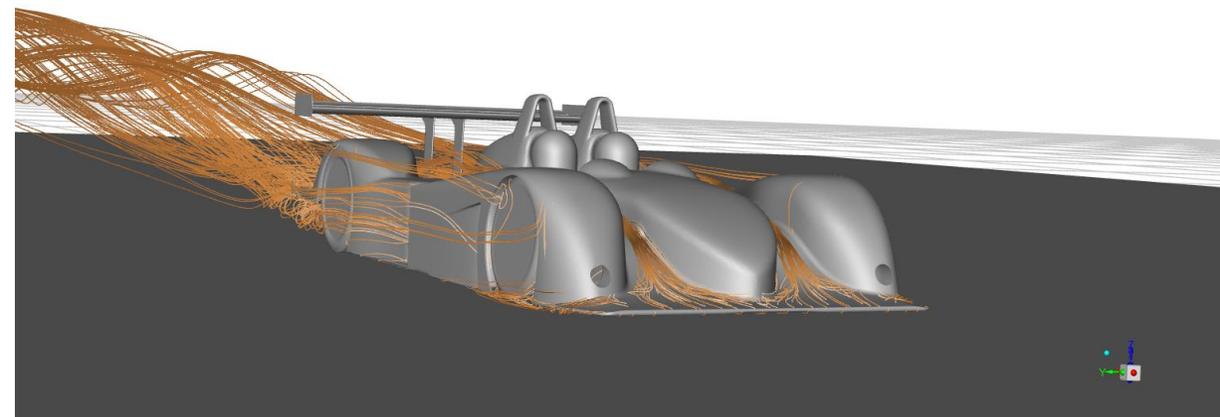
Conclusioni e Sviluppi

Strategia	Valore convergenza spostamento
2-ways	4,24 mm
Sovrapposizione Modale	4,22 mm
Differenza	0,02 mm

Strategia	Valore convergenza spostamenti
2-way	8,446 mm
Sovrapposizione Modale	8,082 mm
Differenza	0,364 mm

la differenza può essere data dal mapper che influenza di circa il 2.5%, inoltre nel due vie vengono esportate solo le pressioni e non le forze viscose

Ansys
2022 R1



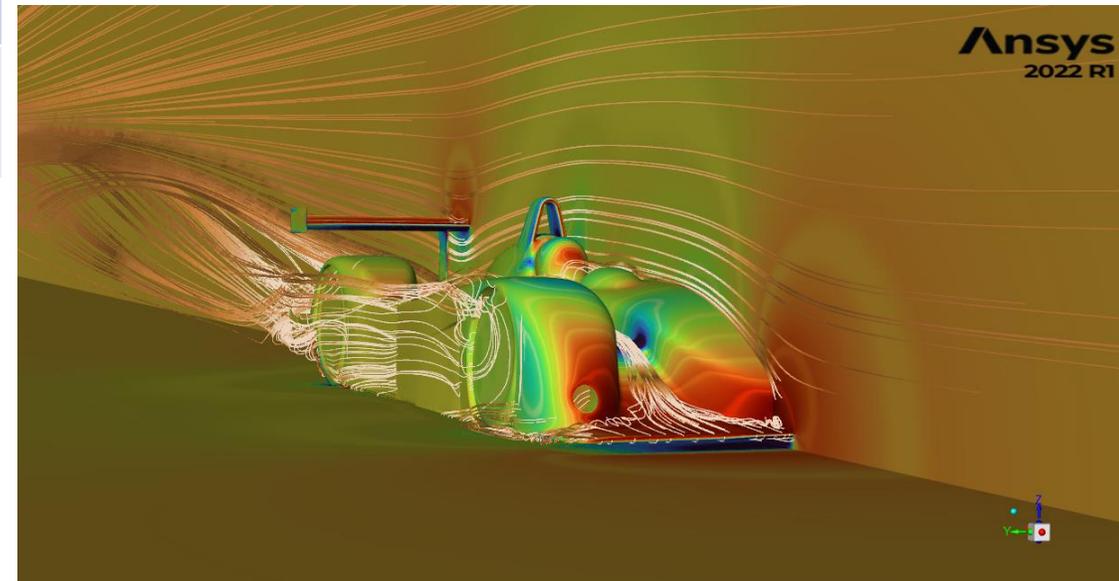
Conclusioni e Sviluppi

Strategia	Tempo Impiegato
2-way con Spider	22 h 10 min
Sovrapposizione Modale con spider	3 h 47 min
2-ways senza Spider	36 h 7 min
Sovrapposizione modale senza spider	9 h 20 min

Sviluppi Futuri:

- Il workflow verrà aggiornato con il mapper di RBF Morph
- La metodologia sviluppata verrà testata da Dallara su veicoli più nuovi

Il risultato in termini di deformazione è molto simile, per questo motivo per problemi lineari è conveniente usare la strategia modale





**Grazie per
L'attenzione**