

ANALISI STABILIZZATORE SIAI MARCHETTI SF-260

CLAUDIO CACCIA

14 luglio 2016

INDICE

1	Strumenti	3
2	Panoramica delle analisi	3
3	Geometria	3
4	Caratterizzazione degli elementi	4
4.1	Centine	4
4.2	Longherone anteriore	6
4.3	Longherone principale	7
4.4	Correnti	8
4.5	Pannelli	8
5	Mesh	9
6	Analisi Preliminari	10
6.1	Simulazione momento torcente	10
6.2	Simulazione momento flettente	10
7	Calcolo tramite teoria a semiguscio	11
7.1	Modello a semiguscio	11
7.2	Calcolo sezione sottoposta momento torcente	11
7.3	Calcolo sezione sottoposta momento flettente	11
7.4	Confronto dei risultati:	12
8	Vincoli	12
9	Carichi	12
9.1	Carichi sulle centine	13
9.2	Carichi sui longheroni	13
10	Materiale	13
11	Analisi	14
12	Conclusioni	15

ELENCO DELLE FIGURE

Figura 1	foto stabilizzatore	2
Figura 2	Geometria stabilizzatore	4
Figura 3	Centina 1 completa	5
Figura 4	Centina 1 confronto VM stress	6
Figura 5	Longherone anteriore completo	8
Figura 6	Longherone anteriore semplificato	9

**Figura 1:** Foto dello stabilizzatore

Figura 7	Mesh Stabilizzatore SF260	16
Figura 8	Test Mz	17
Figura 9	Test Mx	17
Figura 10	modello a semiguscio	18
Figura 11	azioni interne: dati	18
Figura 12	azioni interne distribuite	19
Figura 13	Carichi sulle centine	20
Figura 14	Carichi distribuiti sui longheorni	21
Figura 15	manovra: spostamenti	22
Figura 16	manovra: azioni negli elementi trave	23
Figura 17	manovra: VM stress	24
Figura 18	raffica: spostamenti	25
Figura 19	raffica: azioni negli elementi trave	26
Figura 20	raffica: VM stress	27
Figura 21	pannelli a compressione	28

ELENCO DELLE TABELLE

Tabella 1	Risultati delle analisi sulle centina	7
Tabella 2	Risultati delle analisi sul longherone anteriore	7
Tabella 3	Confronto risultati	12
Tabella 4	Materiale	13
Tabella 5	Sintesi dei risultati	14

OGGETTO

Scopo dell'analisi consiste nell'effettuare una modellazione ad elementi finiti dello stabilizzatore del velivolo *SIAI Marchetti SF-260* (cfr. Figura 1) nelle condizioni di carico specificate nella documentazione fornita, arrivando a determinare la configurazione deformata (freccia massima, angolo di torsione, etc.) ed una stima dello stato di sforzo nella struttura.

STRUMENTI

L'analisi FEM è stata eseguita utilizzando i seguenti software di modellazione e calcolo:

- **Code-Aster** <http://code-aster.org> (vers. 13.1) per la modellazione ad elementi finiti,
- **Salome** <http://www.salome-platform.org> (vers. 7.7.1) per modellazione geometrica e mesh
- **ParaView** <http://www.paraview.org> (vers. 4.7) per il post-processing
- **Python** per ogni attività di calcolo

Il codice scritto per la realizzazione delle analisi è disponibile al seguente indirizzo: https://github.com/Ccaccia73/SF206_stab_analysis

PANORAMICA DELLE ANALISI

Unità di misura adottate: **SI** [N, mm, t]

Lo studio comprende:

- Numero di geometrie: **1**
- Numero di mesh: **3**
- Numero di analisi FEM: **6**

Ad esse si aggiungono alcune analisi complementari per la verifica e l'ottimizzazione dei componenti ed ulteriori calcoli per la verifica della validità delle analisi compiute.

GEOMETRIA

Le parti della geometria sono rappresentate in Figura 2, da cui sono stati soppressi i pannelli superiori per rendere visibili gli elementi:

- Longherone principale (blu)
- Longherone anteriore (verde)
- Centine (grigio)
- Pannelli posteriori (rosso)
- Pannelli anteriori (giallo)

Il sistema di riferimento è illustrato in figura: l'origine è in mezzeria a metà longherone, lo stabilizzatore è diretto lungo z, l'asse x è diretto verso la coda e y verso l'alto.

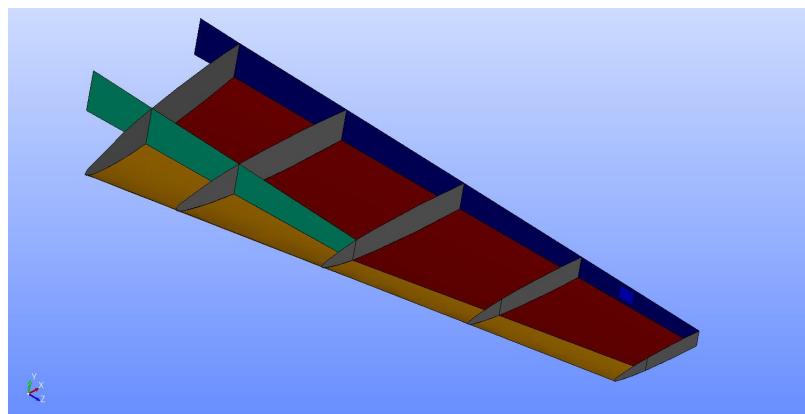


Figura 2: Geometria stab. SF260

CARATTERIZZAZIONE DEGLI ELEMENTI

Prima di procedere all'analisi è necessario caratterizzare opportunamente le componenti dello stabilizzatore, con l'intento di semplificare la struttura il più possibile senza perdere significatività dei risultati.

Centine

La struttura delle 5 centine è composta da un'anima spessa 0.64mm e due flange larghe 15mm. La numerazione parte dalla mezzeria. Le prime 4 centine sono caratterizzate da fori di alleggerimento.

Per semplificare il modello si è scelto di modellare la centina con le seguenti caratteristiche:

- Sono stati trascurati i fori di alleggerimento,
- l'anima è stata modellata con elementi di tipo *shell*,
- le flange sono state modellate con elementi di tipo *beam*.

In questo modo si rischia di perdere informazioni relative ad eventuali concentrazioni di sforzo in corrispondenza dei fori, inoltre la rigidezza flesso-torsionale della centina viene leggermente modificata.

Per ovviare a questi inconvenienti sono state condotte analisi preliminari sulle centine al fine di:

- definire uno spessore equivalente che replichi la stessa rigidezza flessionale della centina (ritenuta l'aspetto più significativo),
- analizzare l'andamento degli sforzi nella centina in condizioni di carico semplici per avere un'indicazione su eventuali concentrazioni di sforzi.

Per ogni centina sono state condotte le seguenti analisi:

- centina originale incastrata in corrispondenza del longherone principale, movimento lungo z impedito e carico unitario in estremità lungo y (cedevolezza flessionale),
- centina originale incastrata in corrispondenza del longherone principale e coppia unitaria in estremità diretta secondo x (cedevolezza torsionale),

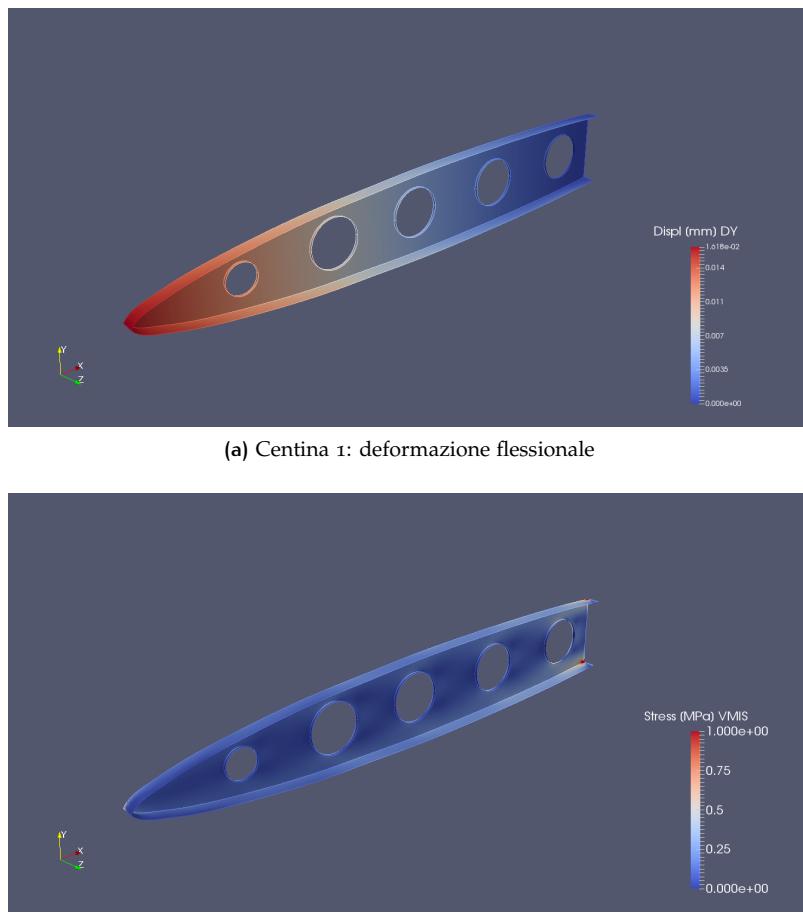


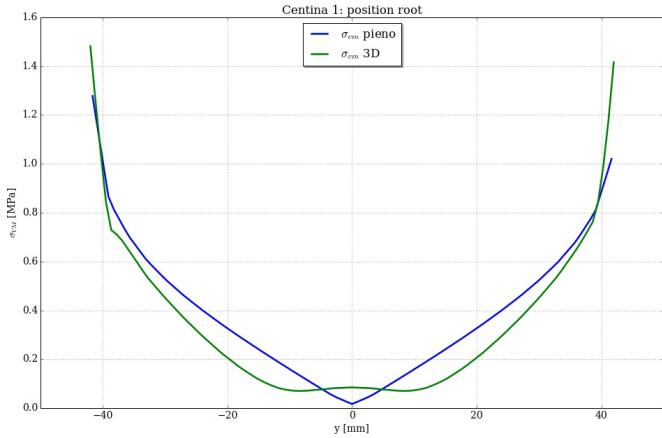
Figura 3: Analisi Centina 1 completa

- centina semplificata caricata nello stesso modo per determinare lo spessore equivalente che garantisca la stessa cedevolezza flessionale, infine verifica della cedevolezza torsionale.

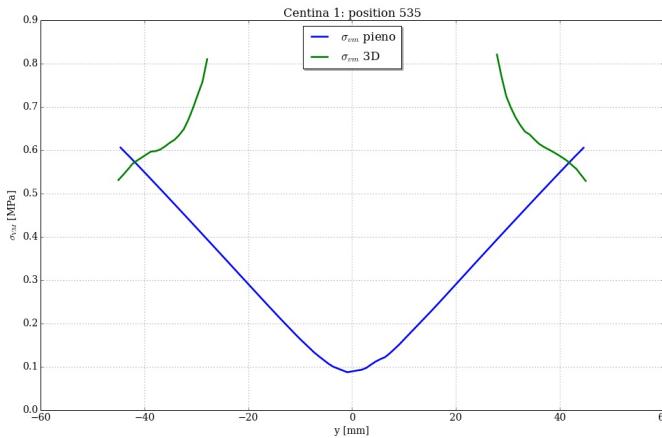
Nelle figure 3 e 4 si riportano ad esempio i risultati ottenuti per la *centina 1*.

La figura 4 fornisce un'indicazione sull'incremento degli sforzi nella centina (all'incastro ed in corrispondenza del primo foro, a 53.5mm dall'incastro) per effetto della presenza dei fori.

La tabella 1 mostra come, a parità di rigidezza flessionale, le centine semplificate risultino più rigide torsionalmente e di poco più leggere. Si ritiene la semplificazione comunque accettabile e si utilizzano tali valori nell'analisi.



(a) Centina 1: VM stress root



(b) Centina 1: VM stress @53.5mm

Figura 4: Centina 1 confronto VM stress

Longherone anteriore

Il longherone anteriore (LA) è lungo 740mm, ha uno spessore di 1.6mm ed è disposto dalla mezzeria fino alla centina 3. Come le centine ha una struttura a "C" con fori di alleggerimento. Presenta inoltre un irrigidimento nella parte centrale. Si operano semplificazioni simili a quelle adottate per le centine:

- Modellizzazione dell'anima a *shell* e delle flange a *beam*
- eliminazione dei fori e determinazione di uno spessore equivalente

Nelle figure 5 e 6 si riportano i risultati ottenuti.

Il calcolo teorico di una mensola incastrata linearmente rastremata con le stesse dimensioni del longherone anteriore fornisce una cedevolezza flessionale di $8 \cdot 10^{-3}$ mm/N contro i $7.89 \cdot 10^{-3}$ mm/N del modello, confermando la validità della simulazione.

La tabella 2 riporta la sintesi dei risultati ottenuti.

Tabella 1: Risultati delle analisi sulle centine

	Completo			Semplificato		
	DY [$\mu\text{m}/\text{N}$]	DRX [$\mu\text{rad}/\text{Nm}\text{m}$]	massa [g]	spessore [μm]	DRX [$\mu\text{rad}/\text{Nm}\text{m}$]	massa [g]
C ₁	16.18	771	105	513	458	95
C ₂	16.52	782	84	497	488	75
C ₃	14.10	880	67	550	372	60
C ₄	13.68	841	45	526	386	39
C ₅	13.26	849	29	508	356	23

Tabella 2: Risultati delle analisi sul longherone anteriore

	Completo			Semplificato		
	DY [$\mu\text{m}/\text{N}$]	DRZ [$\mu\text{rad}/\text{Nm}\text{m}$]	massa [g]	spessore [mm]	DRZ [$\mu\text{rad}/\text{Nm}\text{m}$]	massa [g]
LA	7.89	114	454	1.471	128	429

Longherone principale

Il longherone principale (LP) è privo di fori di alleggerimento, ha degli irrigidimenti in corrispondenza della zona centrale e tra le centine 4 e 5, inoltre ha un corrente a "U" per tutta la lunghezza ed un corrente a "L" fino alla distanza di 510mm. È stato modellato direttamente nel sistema completo, con le seguenti caratteristiche:

- spessori (elementi di tipo *shell*) nelle 5 sezioni del LP:
 - 1.6 + 2mm nella sezione 1, tenendo conto in modo semplificato dell'irrigidimento
 - 1.6mm nelle sezioni 2,3 e 4
 - 1.6 + 2.9mm nella sezione 5, tenendo conto dell'irrigidimento
- elementi di tipo *beam*:
 - corrente a "U" più corrente a "L" nelle sezioni 1 e 2, tenendo conto in modo semplificato del corrente a "L", più lungo e rastremato
 - corrente a "U" nelle sezioni 3 e 4
 - corrente a "U" più flangia da $2.9 \times 25\text{mm}$ nella sezione 5

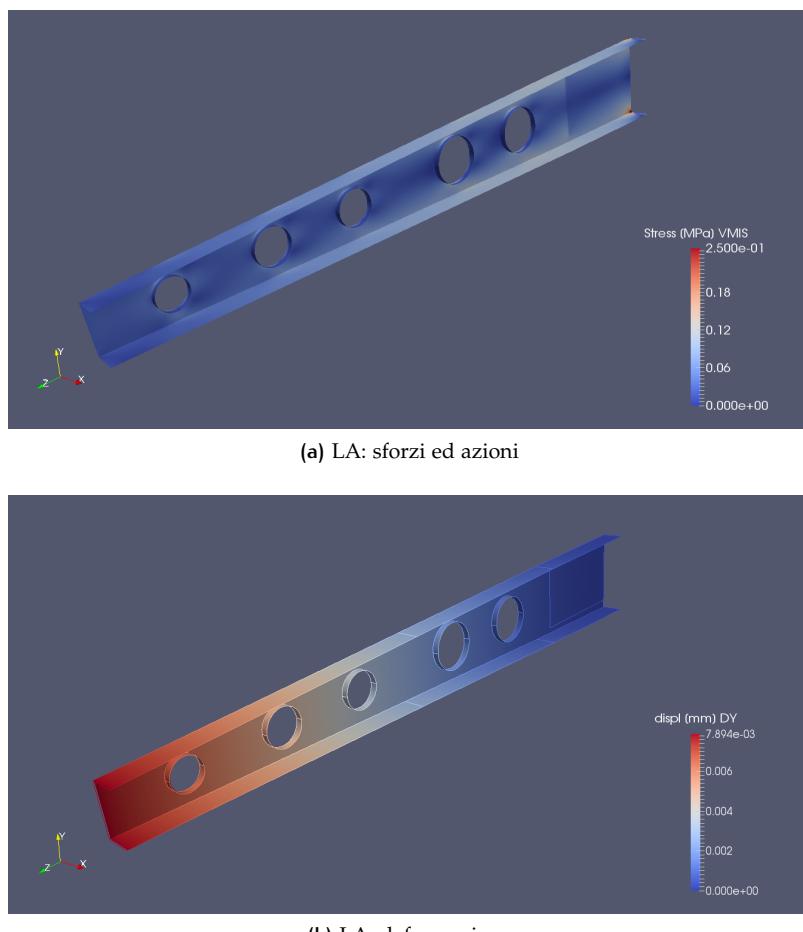


Figura 5: Analisi longherone anteriore completo

Correnti

Oltre ai correnti nel longherone principale sono presenti dei correnti a "L" nelle sezioni 4 e 5, oltre il longherone principale. Vengono modellati con elementi di tipo *beam*.

Pannelli

Tutti i pannelli vengono modellati con elementi di tipo *shell*, spessi 0.64mm nella parte anteriore (fino al LA o ai correnti) e 0.81mm nella parte posteriore.

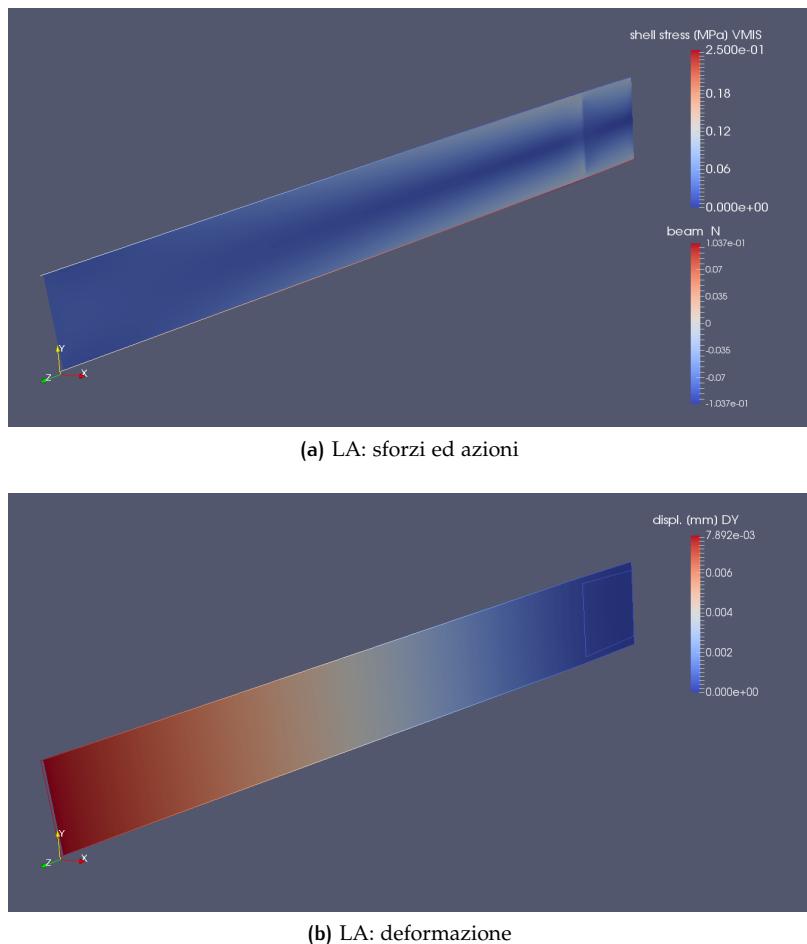


Figura 6: Analisi longherone anteriore semplificato

MESH

La mesh è stata generata per ogni componente, realizzando poi un'unica *compound mesh* e verificando che gli elementi (nodi e spigoli) fossero coincidenti. La mesh è composta da 7271 elementi lineari di cui:

- 7138 elementi di tipo *QUAD4*
- 133 elementi di tipo *TRIA3*

ANALISI PRELIMINARI

Prima di procedere alle analisi con i carichi dovuti a raffica e manovra, si è deciso di eseguire dei test preliminari con carichi semplificati, in modo da poter eseguire un confronto con un modello analitico a semiguscio e verificare così la validità del modello finora realizzato. Per quanto riguarda i vincoli sono state adottate le condizioni descritte in [8](#).

Sono stati eseguiti due test:

- Momento torcente $M_z = 1000 \text{ Nmm}$ applicato alla centina 5 tramite un elemento di tipo *RBE3*
- Momento flettente $M_x = 1000 \text{ Nmm}$ applicato alla centina 5 tramite un elemento di tipo *RBE3*

Sono stati poi misurati gli spostamenti medi e le rotazioni medie della centina 5 e confrontati con i risultati analitici.

Simulazione momento torcente

La simulazione fornisce un valore medio di rotazione intorno a z pari a $3.104 \cdot 10^{-5} \text{ rad}$.

La figura [8](#) mostra l'andamento della deformazione.

Simulazione momento flettente

La simulazione fornisce un valore medio di rotazione intorno a x pari a $1.548 \cdot 10^{-5} \text{ rad}$ ed uno spostamento medio lungo y di $-1.01 \cdot 10^{-2} \text{ mm}$.

La figura [9](#) mostra l'andamento della deformazione.

CALCOLO TRAMITE TEORIA A SEMIGUSCIO

Per il corso di *Strutture Aerospaziali* avevo sviluppato un programma per il calcolo dei parametri delle sezioni a semiguscio. Il codice è disponibile qui: <https://github.com/Ccaccia73/semonocoque>. In particolare, i calcoli eseguiti per lo stabilizzatore sono riportati qui: http://nbviewer.jupyter.org/github/ccaccia73/semonocoque/blob/master/10_Stab_SF260.ipynb

Modello a semiguscio

Lo stabilizzatore è stato suddiviso in 5 sezioni. Come dimensione in direzione x è stato considerato il valore medio del tratto in esame. Si è trascurato l'angolo di inclinazione della centina 1 e sono state considerate le aree e gli spessori determinati in precedenza per il modello FEM. Per i longheroni si è utilizzato il metodo dell'*area collaborante*.

La figura 10 illustra le 5 sezioni descritte nel modello a semiguscio. I valori dei parametri sono visibili al link sopra.

Calcolo sezione sottoposta momento torcente

Il modello a semiguscio fornisce una stima della rigidezza torsionale J_{ti} per ogni tratto dello stabilizzatore. L'angolo totale di torsione viene calcolato tramite:

$$\phi = \frac{M_z}{G} \cdot \sum_{i=1}^5 \frac{L_i}{J_{ti}} \quad (1)$$

con L_i lunghezza del tratto i -esimo.

Il calcolo fornisce un valore di $\phi = 3.021 \cdot 10^{-5}$ rad.

Calcolo sezione sottoposta momento flettente

Il modello a semiguscio fornisce una stima della rigidezza flessionale J_{xi} per ogni tratto dello stabilizzatore. L'angolo di flessione all'estremità viene calcolato tramite:

$$\theta = \frac{M_x}{E} \cdot \sum_{i=1}^5 \frac{L_i}{J_{xi}} \quad (2)$$

Il calcolo fornisce un valore di $\theta = 1.688 \cdot 10^{-5}$ rad.

Lo spostamento verticale δ dell'estremità deriva dalle seguenti espressioni:

$$\delta = \int_0^l M_x \cdot \frac{z-l}{EJ_x(z)} dz \quad (3)$$

Suddividendo l'integrale nei tratti a J_x costante si ottiene:

$$\delta = \sum_{i=1}^5 \frac{l_i}{EJ_{xi}} \left\{ \frac{\bar{z}_i}{2} - l \right\} \quad (4)$$

Con l_i lunghezza del tratto i -esimo e \bar{z}_i posizione di metà tratto.

Il calcolo fornisce un valore di $\delta = -0.0085$ mm.

Confronto dei risultati:

Tabella 3: Confronto risultati

	Valori	
	SG	FEM
tors. ϕ [μrad]	30.21	31.04
flex. θ [μrad]	16.88	15.48
flex. δ [μm]	-85	-101

La rispondenza tra il modello ad elementi finiti ed il modello a semiguscio viene ritenuta buona, pertanto si considera il modello *FEM* affidabile.

VINCOLI

Essendo la struttura simmetrica, caricata in modo simmetrico, è possibile analizzare solo la semiapertura dello stabilizzatore. Si è pertanto scelto di vincolare tramite incastro i due longheroni. In questo modo si mantiene una struttura semplice, si perdono però eventuali informazioni relative alla reale condizione di vincolo tra fusoliera e stabilizzatore, che può essere oggetto di un'analisi specifica.

CARICHI

Vengono considerate due condizioni di carico ritenute significative, *manovra* e *raffica*. Di queste sono disponibili le azioni interne in diversi punti dello stabilizzatore (cfr. figura 11). Vengono qui riportati i risultati ottenuti dall'analisi dei carichi, i calcoli effettuati sono riportati qui:

http://nbviewer.jupyter.org/github/ccaccia73/SF206_stab_analysis/blob/master/04_carichi/actions.ipynb.

È presente un carico concentrato a 1200 mm dalla mezzeria, in corrispondenza dell'attacco dell'equilibratore. Tale carico corrisponde ad una forza concentrata pari a:

- -841.4 N in caso di manovra
- -172.8 N in caso di raffica

Tale forza ha un braccio di 40mm dal longherone principale e viene modellata tramite un elemento *RBE3* che agisce su una regione del longherone principale corrispondente alla piastra di connessione con l'equilibratore.

Le componenti rimanenti sono considerate forze distribuite e si può verificare la relazione $T_y = \frac{dM_x}{dz}$ (cfr. figura 12, a meno del segno):

Per caricare la struttura si possono adottare diverse filosofie. Si è scelto qui di considerare i seguenti casi:

1. Caricare le *centine*, un elemento *RBE3* posizionato sul longherone principale per ogni centina ne carica il bordo, trasmettendo T_y e M_z . Ricalca la teoria e fornisce un'approssimazione un po' grossolana di T_y e M_z .

2. Caricare con una forza superficiale costante ogni sezione dei *longheroni*. Riproduce T_y in modo fedele, tuttavia l'assenza del longherone anteriore nelle sezioni 4 e 5 rende molto approssimato M_z nel tratto esterno dello stabilizzatore.

Di seguito si illustrano le due filosofie adottate.

Carichi sulle centine

La figura 13 illustra l'andamento delle azioni interne ottenuto caricando le centine.

Carichi sui longheroni

La figura 14 illustra l'andamento delle azioni interne ottenuto caricando i longheroni. Si nota che, scegliendo di caricare il solo longherone anteriore per dare momento torcente, l'azione M_z è replicata in modo scadente. Tuttavia, essendo una zona a basso carico l'approssimazione potrebbe essere comunque adeguata.

MATERIALE

Tutta la struttura è realizzata in A2024, materiale elastico lineare ed isotropo, di cui sono state considerate le seguenti caratteristiche 4:

Tabella 4: Materiale

Proprietà				
	E [MPa]	ν	ρ [kg/m ³]	σ_y [MPa]
A2024	73100	0.33	2780	324

Poiché risulta dal modello che la massa complessiva dello stabilizzatore è pari a 5.44 kg, si decide di trascurare il peso proprio della struttura, così come il peso della vernice.

Tabella 5: Sintesi dei risultati

simulazione	deformazione			reazioni vincolari		
	δ [mm]	θ [mrad]	ϕ [mrad]	R_y [N]	M_x [Nm]	M_z [Nm]
Centine manovra	-11.21	12.8	6.83	2875	-2315	-367
longh. manovra	-10.82	11.7	-3.25	2852	-2264	-292
Centine raffica	-8.15	9.1	3.20	2696	-1822	-834
longh. raffica	-7.62	8.2	-0.18	2640	-1723	-814

ANALISI

Sono state condotte 4 differenti analisi, una per ciascun tipo di carico e modalità di applicazione. La tabella 5 riporta la sintesi dei risultati ottenuti.

La sintesi dei risultati mostra come lo stabilizzatore sia sollecitato e si deformi flessionalmente. L'applicazione di carichi concentrati sulle centine garantisce anche una maggior rispondenza delle reazioni di incastro con i dati di progetto.

La stima dei carichi distribuiti sui longheroni risulta essere in difetto e dovrebbe essere rivista, anche se la differenza in termini di deformazione flessionale è minima. Inoltre, l'assenza di momento torcente nella parte esterna dello stabilizzatore porta a risultati contrastanti dal punto di vista dell'angolo di torsione.

Le figure 15, 16 e 17 mostrano i risultati ottenuti per il caso *manovra*, mentre le figure 18, 19 e 20 mostrano i risultati ottenuti per il caso *raffica*.

La figura 21 mostra il livello di σ di compressione nei pannelli inferiori.

CONCLUSIONI

I RISULTATI ottenuti mostrano come il comportamento della struttura sia prevalentemente flessionale e, come logico attendersi, il carico più critico è quello dovuto a manovra. La deformazione dello stabilizzatore risulta comunque contenuta, tale da non modificare l'operatività della superficie aerodinamica.

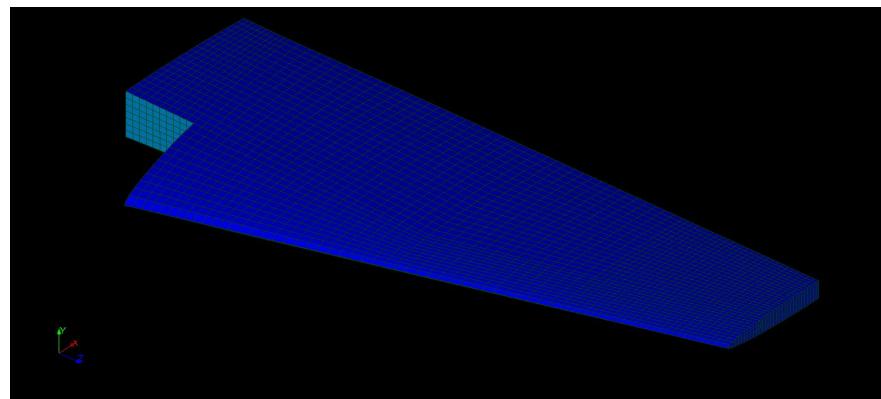
Le analisi evidenziano come la regione di attacco dello stabilizzatore sia quella maggiormente caricata. Per il modello adottato il livello degli sforzi risulta comunque contenuto al di sotto di limiti critici.

La validità e coerenza del modello è stata testata per i seguenti aspetti:

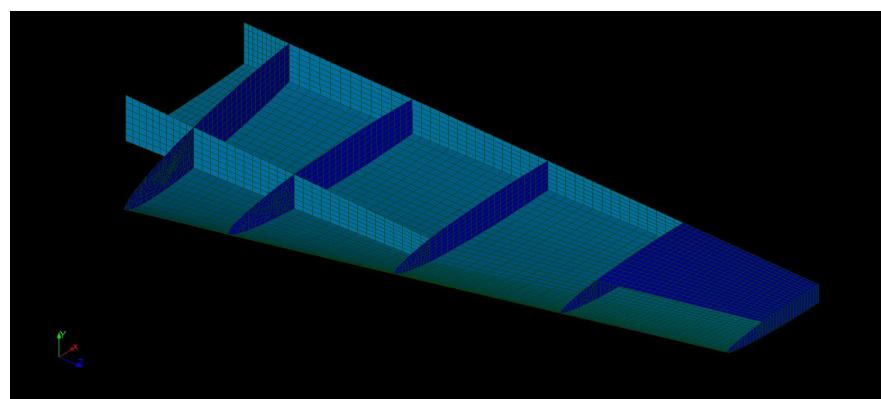
- confronto con modello a semiguscio,
- verifica dei valori attesi di risultante e momento risultante complessivi delle forze applicate,
- verifica della corretta applicazione dei carichi tramite elementi di tipo *RBE3* (anche attraverso modelli semplificati di supporto),
- verifica del corretto orientamento degli assi degli elementi di tipo *beam*,
- verifica del corretto orientamento degli assi principali degli elementi di tipo *shell*,
- verifica di qualità della mesh (presenza di nodi o *edge orfani*, *aspect ratio* degli elementi).

ANALISI ulteriori dovrebbero comprendere:

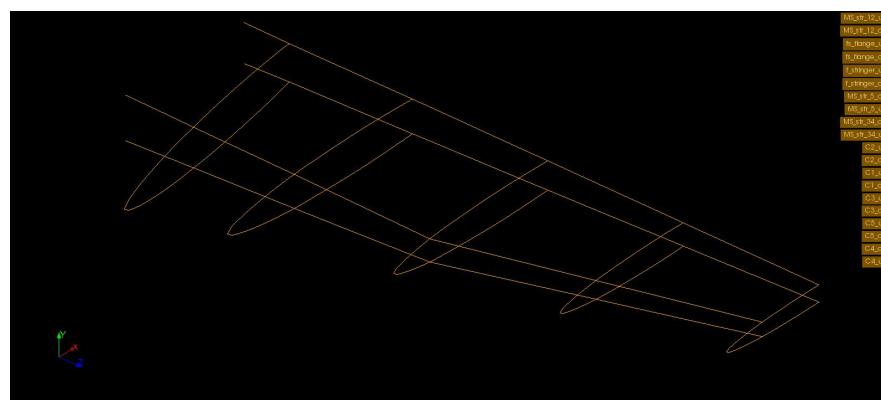
- confronto con eventuali risultati sperimentali
- eventuale raffinamento della mesh, o utilizzo di elementi quadratici, per verificare l'assenza di picchi di sforzo che possono essere stati trascurati nell'analisi,
- studio di dettaglio della zona di incastro per verificare la resistenza della connessione alla fusoliera,
- valutazioni più approfondite sui pannelli soggetti a compressione per valutare eventuali fenomeni di instabilità,
- calcolo delle frequenze proprie e dei modi di vibrare principali.



(a) mesh: pannelli



(b) mesh: centine e longheroni



(c) mesh: elementi beam

Figura 7: mesh dello stabilizzatore

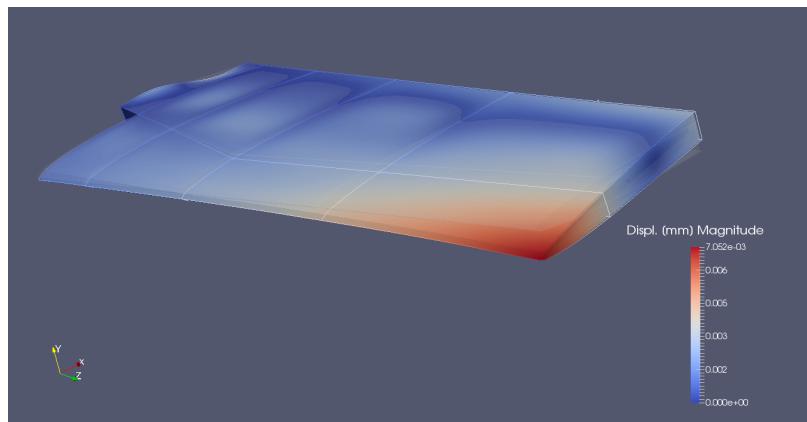


Figura 8: Test momento torcente

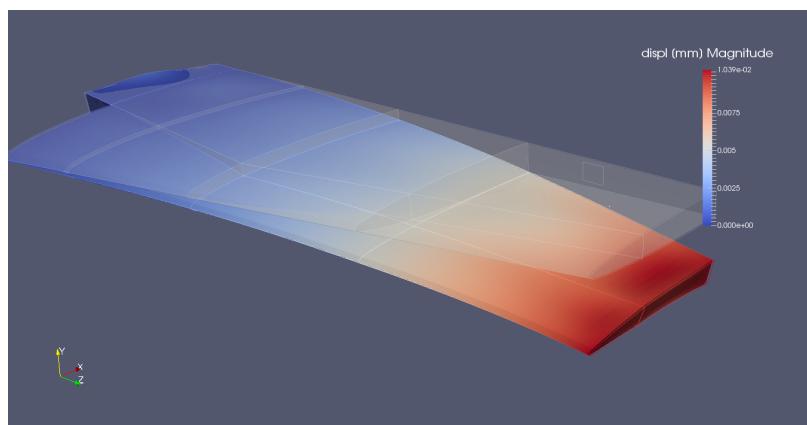


Figura 9: Test momento flettente

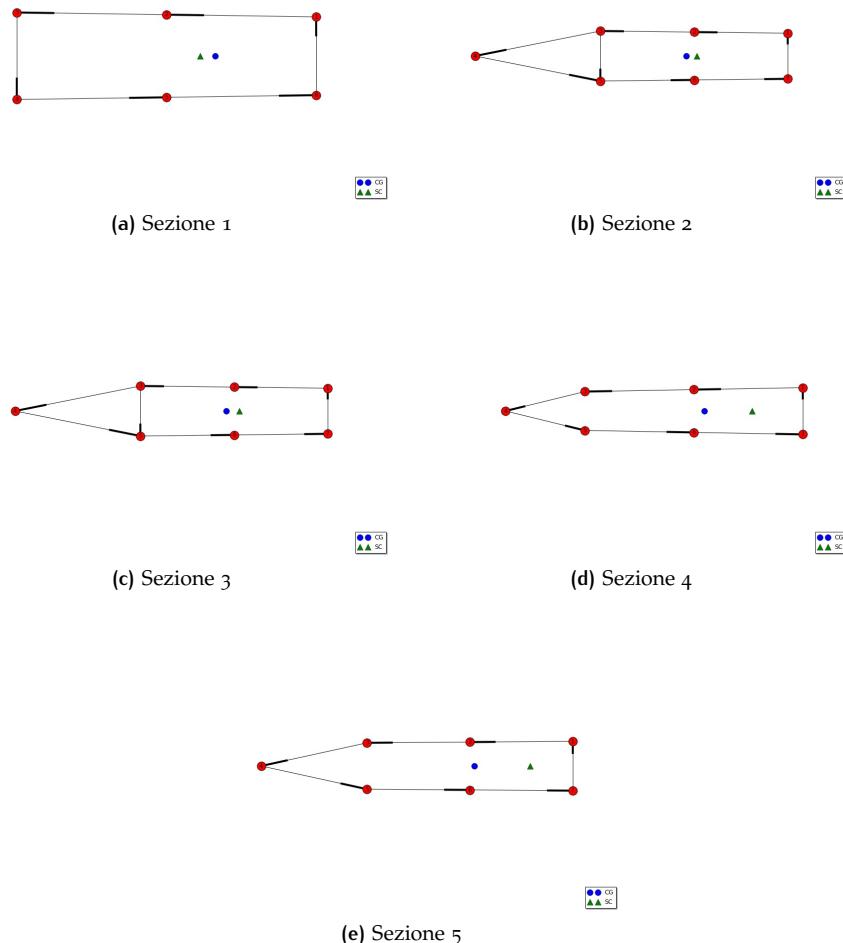


Figura 10: Sezioni a semiguscio dello stabilizzatore

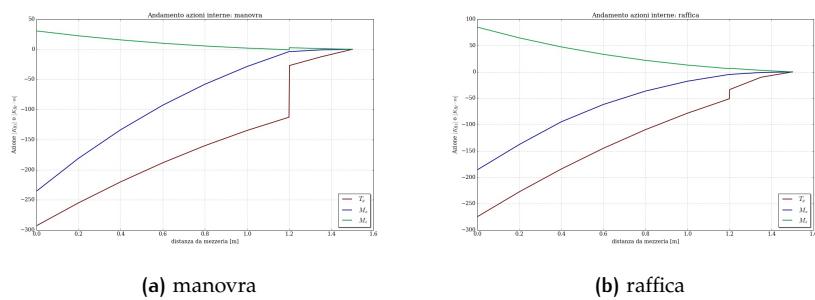


Figura 11: Azioni interne: dati

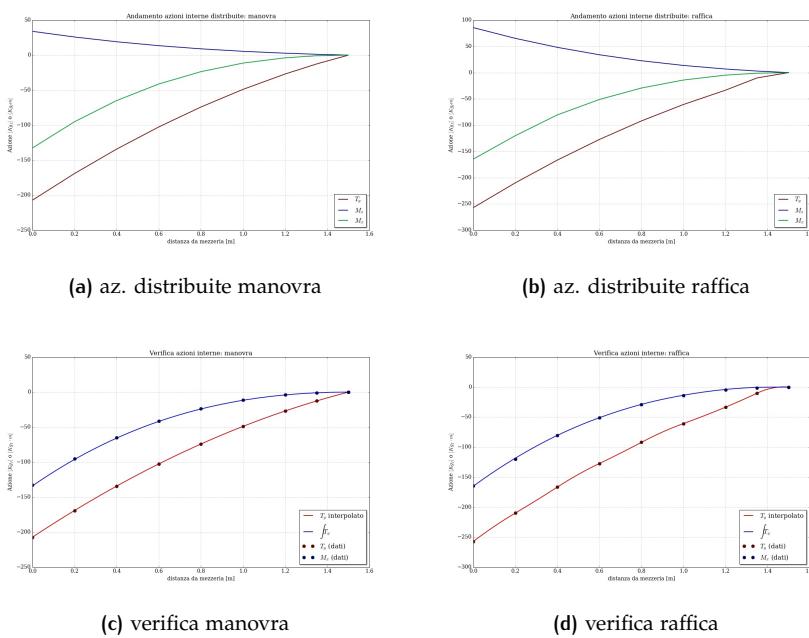
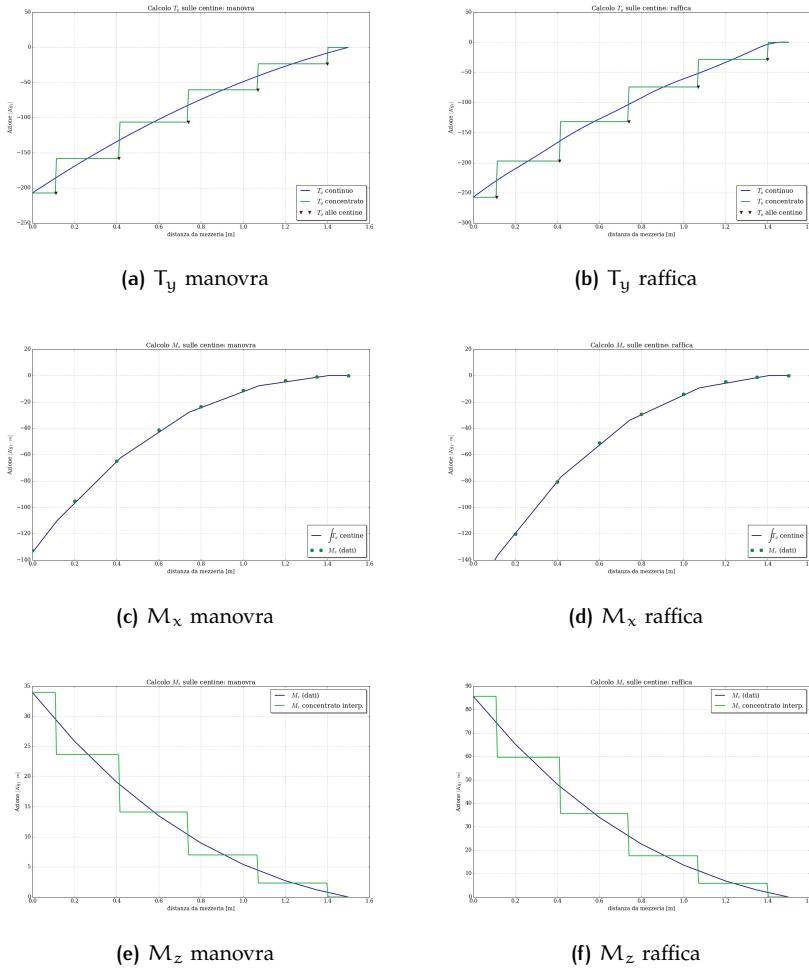


Figura 12: Azioni interne distribuite

**Figura 13:** Carichi sulle centine

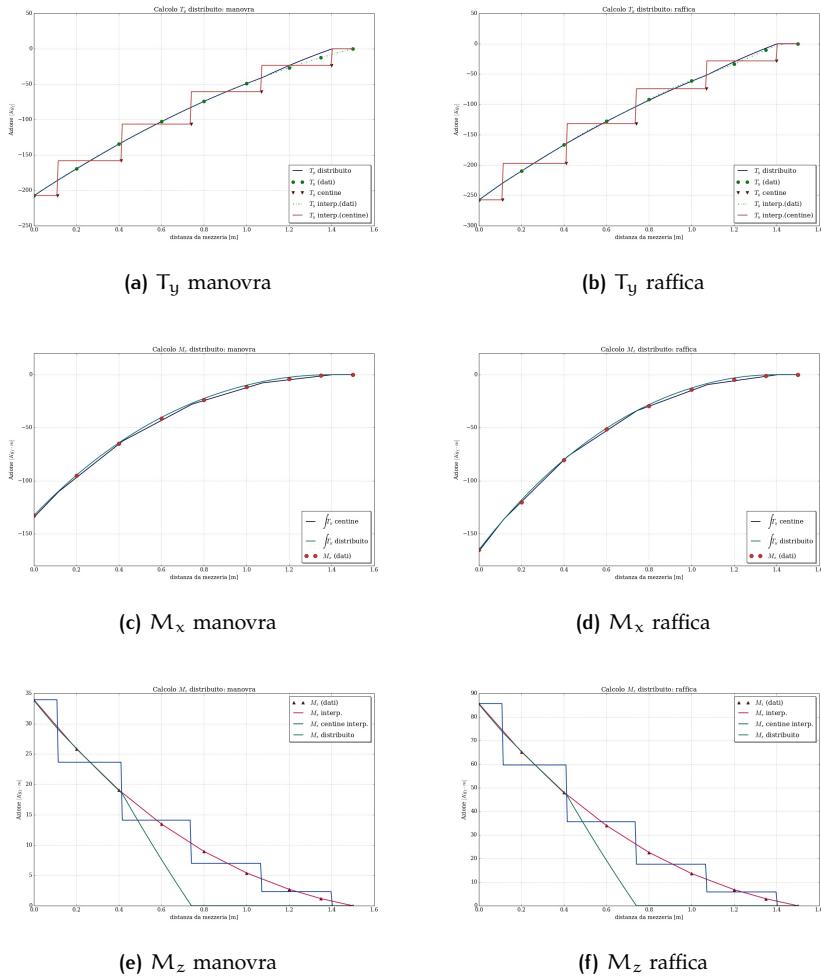
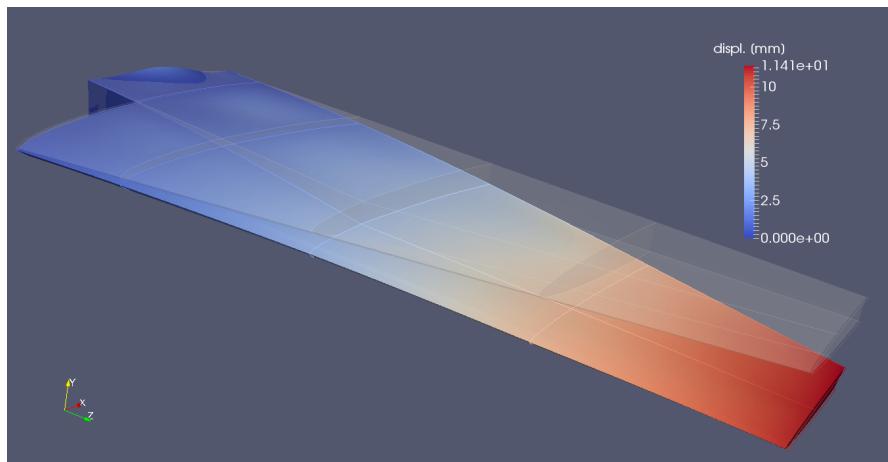
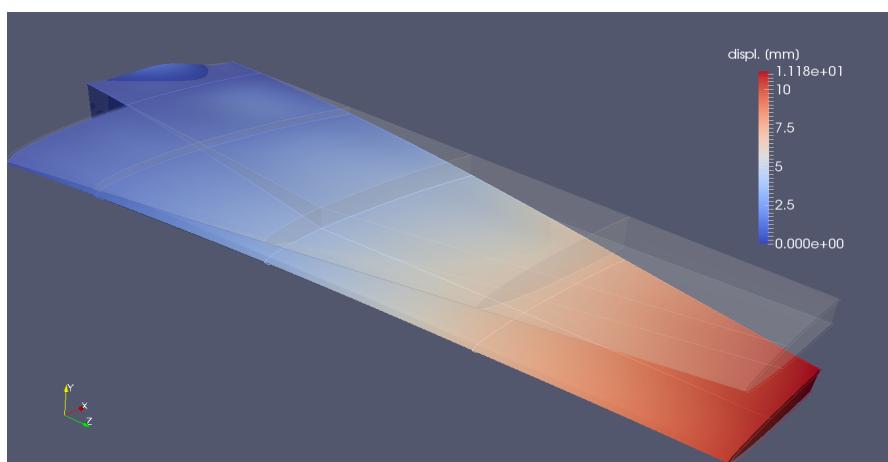


Figura 14: Carichi distribuiti sui longheroni

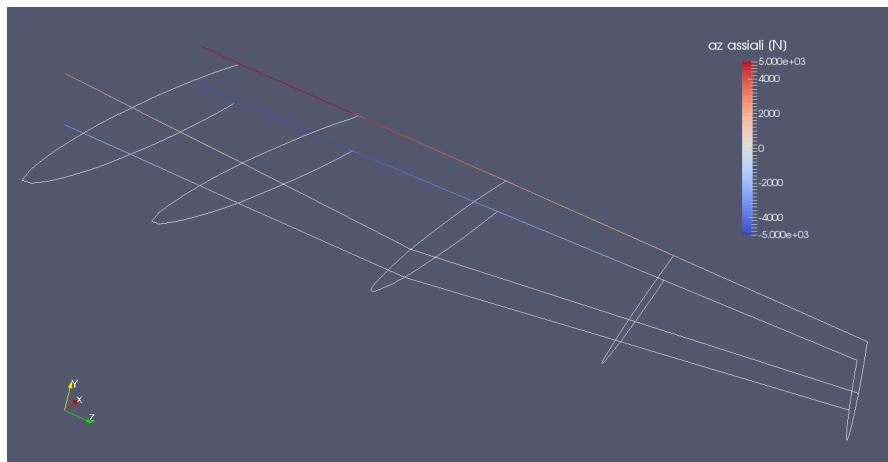


(a) carichi su centine

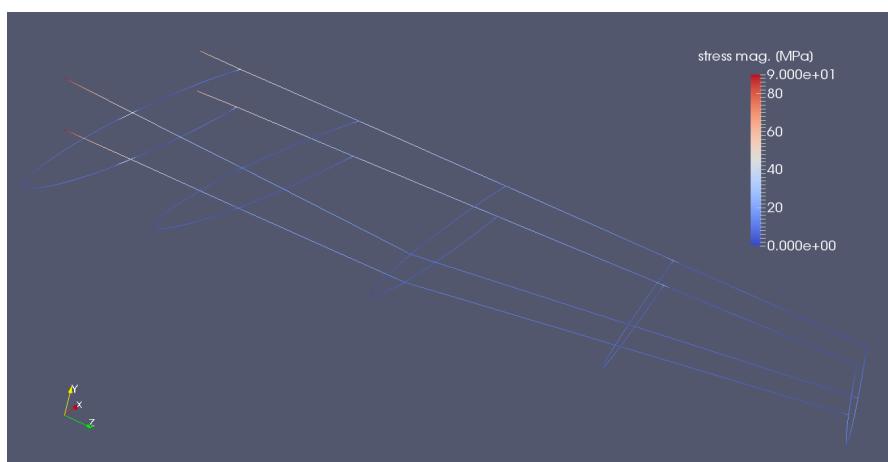


(b) carichi su longheorni

Figura 15: manovra: spostamenti



(a) az. assiale nei correnti

(b) σ_{\max} nei correnti**Figura 16:** manovra: azioni negli elementi trave

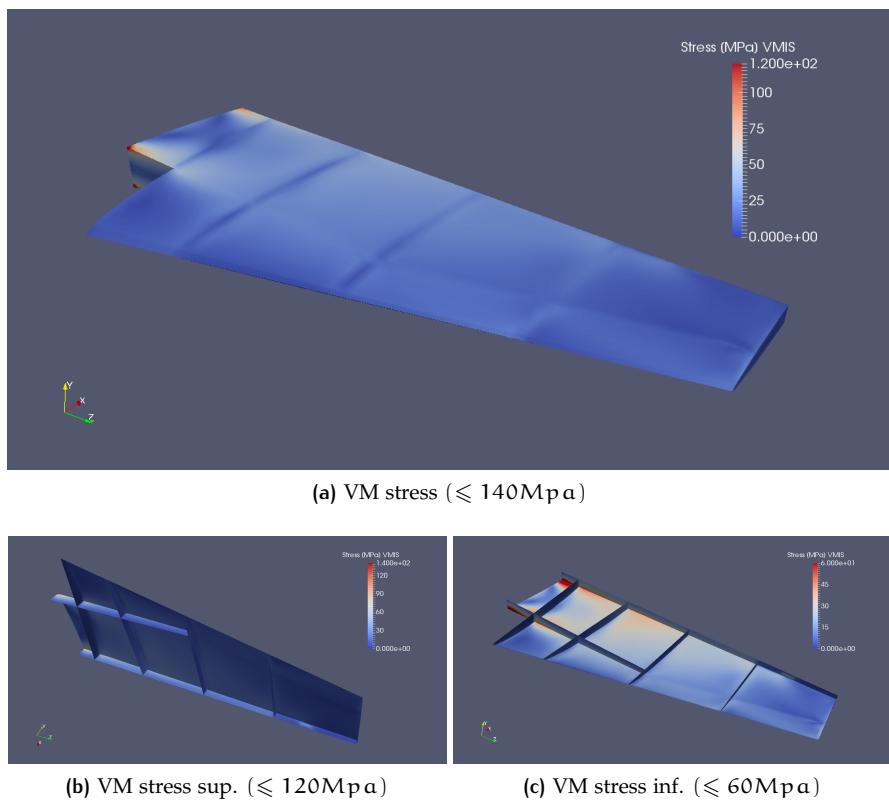
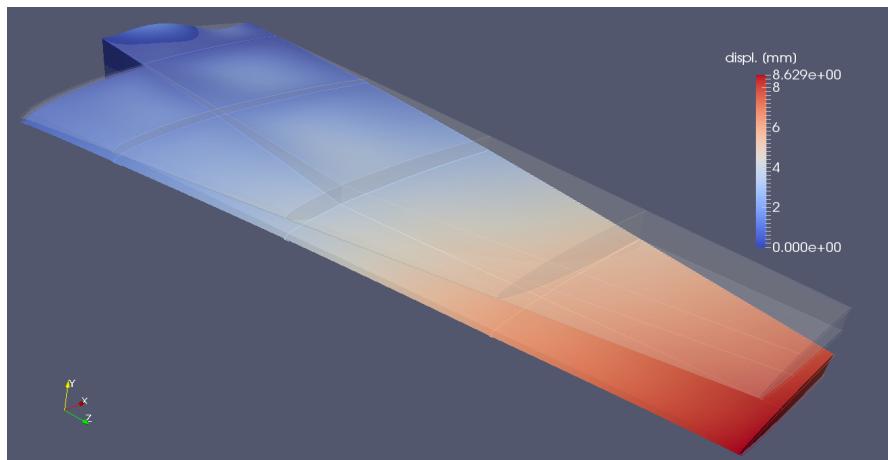
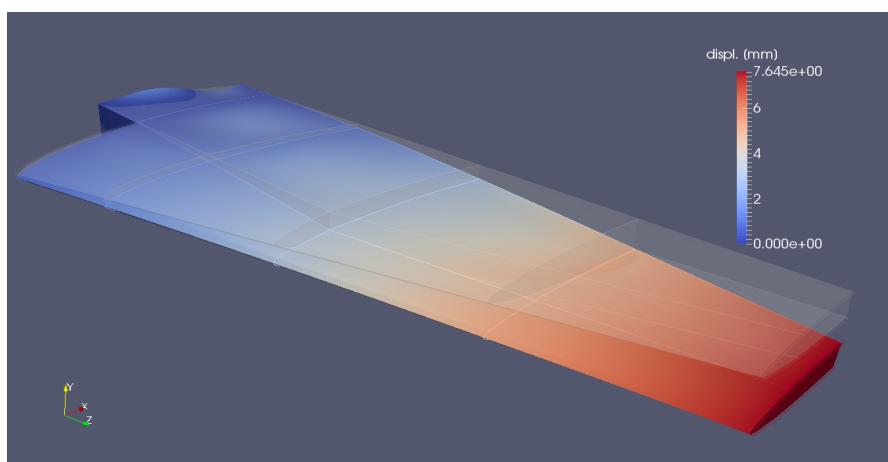


Figura 17: manovra: VM stress

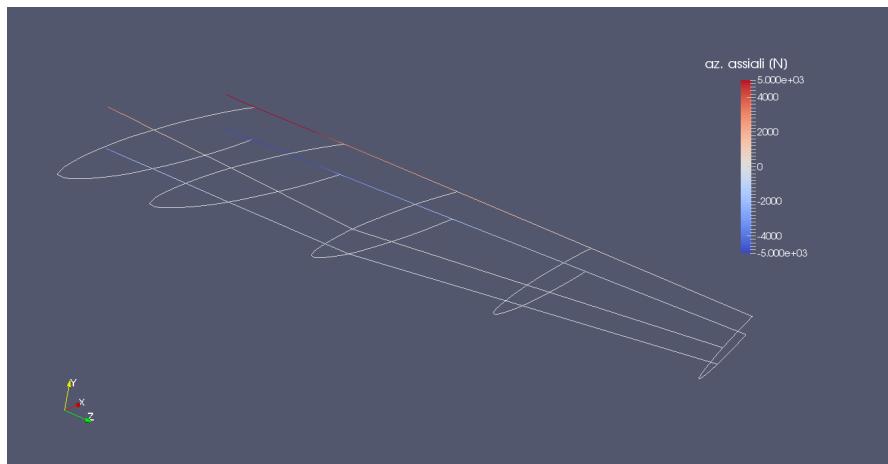


(a) carichi su centine

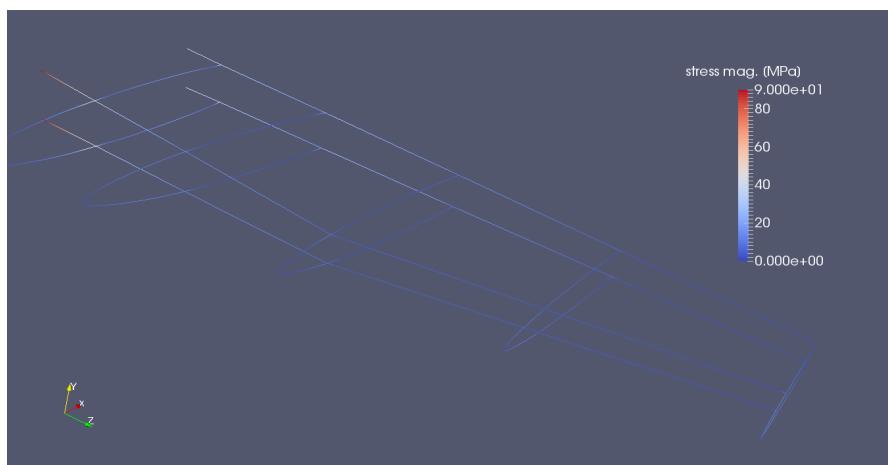


(b) carichi su longheorni

Figura 18: raffica: spostamenti



(a) az. assiale nei correnti

(b) σ_{\max} nei correnti**Figura 19:** raffica: azioni negli elementi trave

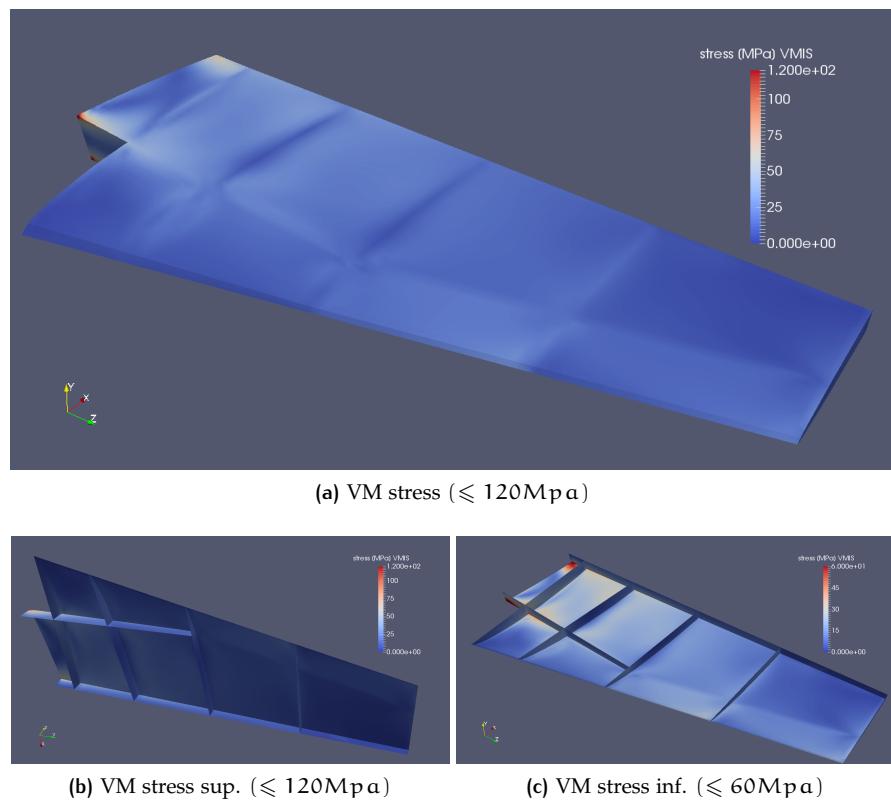
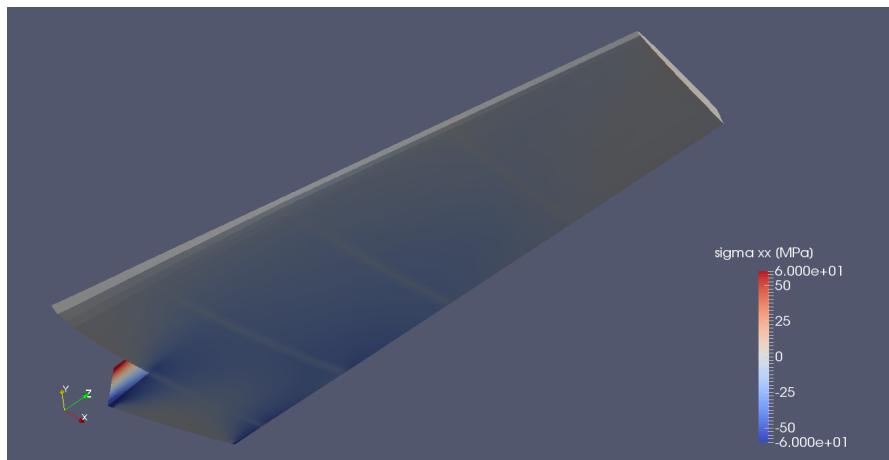
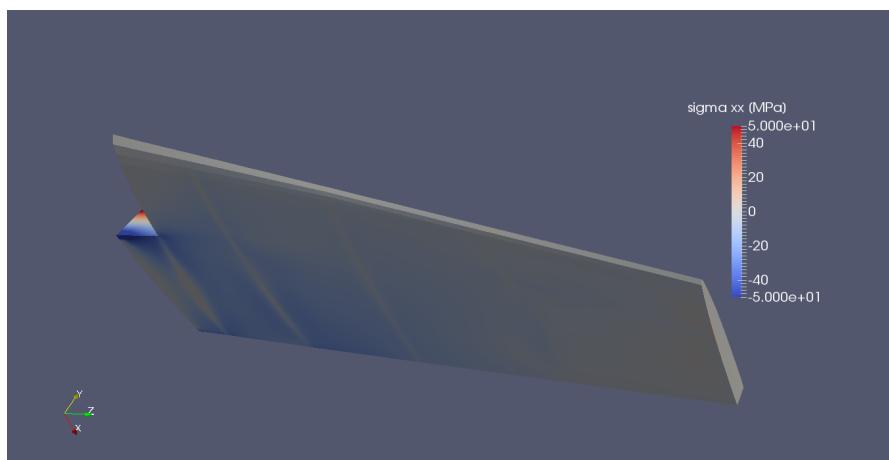


Figura 20: raffica: VM stress

(a) manovra σ_{xx} min(b) raffica σ_{xx} min**Figura 21:** pannelli a compressione