

POLITECNICO DI TORINO

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Aerospaziale

Tesi

Analisi F.E.M. dell'elica di un drone per applicazioni spaziali



Studente:

Sciumbarruto Alberto (s248422)

Relatore:

Matteo Filippi

Anno Accademico 2022-2023

Indice

1	Droni per esplorazione spaziale	11
1.1	NASA's Ingenuity Mars Helicopter	11
1.2	I precursori di Ingenuity	12
1.3	L'atmosfera di Marte	13
1.4	Profili alari ottimizzati per basso numero di Reynolds	14
1.4.1	I profili corrugati e la distribuzione di spessore	16
1.5	La struttura dei profili alari	18
2	Analisi F.E.A.	21
2.1	Fasi dell'analisi	22
3	Pre-Processing	23
3.1	Interfaccia di Hyperworks	23
3.2	Optistruct	24
3.3	Il modello CAD	27
3.3.1	Correzione geometria	27
3.4	Generazione della Mesh	29
3.4.1	Mesh 2D	30
3.4.2	Tetramesh	34
4	Correzione & Ottimizzazione della Mesh	37
4.1	Quality index, smooth panel, elements cleanup	39
4.1.1	Warpage, Skew, jacobian per la mesh 2D	39
4.1.2	Volume skew, Tetra collapse e minimum size per la Tetra Mesh	41
5	Materiali, proprietà & Boundary conditions	48
5.1	Materiali e Proprietà PSHELL 2D	48
5.2	Spessore	49
5.3	Materiali e Proprietà PSOLID 3D	51
5.4	Boundary Condition	52
6	Processing	54
6.1	Analisi Modale	54
6.2	Load step per l'analisi modale	54
6.3	Load collector per l'analisi lineare	56
7	Post-Processing	59
8	Risultati Analisi Modale	64
8.1	Analisi modale mesh 1mm	64
8.2	Analisi modale mesh 2mm	65
8.3	Analisi modale mesh 5mm	67
8.4	Confronto risultati e descrizione	70
8.5	Visualizzazione grafica dei risultati	75
9	Risultati Analisi Lineare	83

9.1	Spostamenti	83
9.1.1	Spostamenti con mesh da 5 mm	83
9.1.2	Spostamenti con mesh da 2 mm	84
9.1.3	Spostamenti con mesh da 1 mm	85
9.2	Deformazioni	89
9.2.1	Deformazioni con mesh da 5 mm	89
9.2.2	Deformazioni con mesh da 2 mm	91
9.2.3	Deformazioni con mesh da 1 mm	93
9.3	Tensioni	98
9.3.1	Tensioni con mesh da 5 mm	98
9.3.2	Tensioni con mesh da 2 mm	100
9.3.3	Tensioni con mesh da 1 mm	102
9.4	Ulteriori risultati in output	107
10	Conclusioni	109
11	Bibliografia	111

Elenco delle figure

1	Design di Ingenuity	11
2	Design dei droni marziani MARV, GTMARS, MEUAV, VITAS, JMH	12
3	Variazione del coefficiente di portanza e resistenza in relazione alla sezione massima e al Re	14
4	Variazione del coefficiente di portanza e resistenza in relazione all'angolo di attacco e al Re	14
5	Andamento del flusso attorno al profilo all'aumentare del Re	15
6	Performance dei diversi tipi di profili alari in relazione al Re	16
7	Il profilo alare del drone Ingenuity	18
8	Il modello della struttura del profilo alare del drone Ingenuity	19
9	Il modello agli elementi finiti del profilo alare del drone Ingenuity	19
10	Le deformazioni del profilo	20
11	Il failure factor	20
12	Metodi matematici per l'analisi ingegneristica	21
13	Interfaccia Hyperworks	23
14	Selezione Solutore in Hyperworks	24
15	Esempio di errore geometrico dovuto all'importazione del CAD	28
16	Il pannello Geom-Quick Edit	28
17	Il modello CAD pre-correzione geometria	29
18	Il modello CAD post-correzione geometria	29
19	Eliminazione solidi pre-mesh	30
20	Il pannello automesh	31
21	Il pannello density	32
22	Il pannello mesh style	33
23	Il pannello tetramesh	35
24	Il pannello Tetramesh parameters	36
25	Una mesh sconnessa	37
26	Il pannello Replace	38
27	Il pannello Free Edges	38
28	La mesh correttamente chiusa	39
29	Warpage	39
30	Skew di un elemento tria	40
31	Skew di un elemento quad	40
32	Lenght (valore min)	41
33	Tetra Collapse	42
34	Volume Skew	42
35	Il Quality Index	43
36	I criteri del Quality Index	44
37	Il pannello smooth	45
38	I cleanup tools	46
39	Il pannello element cleanup	47
40	La mesh ottimizzata	47
41	La scheda materiale	48
42	La scheda proprietà mesh 2D PSHELL	49
43	Top Option in ZOFFS	50

44	Bottom Option in ZOFFS	50
45	La scheda proprietà Tetramesh PSOLID	51
46	Il pannello Constraint	52
47	I vincoli applicati nella superficie inferiore dell'albero	53
48	Il load step input EIGRL	55
49	Il load step EIGRL	56
50	Rappresentazione grafica del comando RFORCE e dei suoi componenti	56
51	Il pannello distance	57
52	Il load collector RFORCE	57
53	Il load step ROTATION	58
54	I risultati dell'analisi modale mesh 1mm spessore 1mm	59
55	La visualizzazione dei dati in HyperView	60
56	Il pannello Contour	60
57	La differenza tra un risultato grafico senza e con operazione di averaging	62
58	Il pannello Deformed	62
59	Il pannello Animation Controls	63
60	Il pannello Subcases	63
61	Modi di vibrare 1	75
62	Modi di vibrare 2	75
63	Modi di vibrare 3	76
64	Modi di vibrare 4	76
65	Modi di vibrare 5	76
66	Modi di vibrare 6	77
67	Modi di vibrare 7	77
68	Modi di vibrare 8	77
69	Modi di vibrare 9	78
70	Modi di vibrare 10	78
71	Element Strain Energy 1	79
72	Element Strain Energy 2	79
73	Element Strain Energy 3	79
74	Element Strain Energy 4	80
75	Element Strain Energy 5	80
76	Element Strain Energy 6	80
77	Element Strain Energy 7	81
78	Element Strain Energy 8	81
79	Element Strain Energy 9	81
80	Element Strain Energy 10	82
81	Spostamenti con spessore 1mm	83
82	Spostamenti con spessore 0.7mm	83
83	Spostamenti con spessore 1.3mm	83
84	Spostamenti con spessore 1mm	84
85	Spostamenti con spessore 0.7mm	84
86	Spostamenti con spessore 1.3mm	84
87	Spostamenti con spessore 1mm	85
88	Spostamenti con spessore 0.7mm	85
89	Spostamenti con spessore 1.3mm	85

90	Deformazioni con spessore 1mm senza averaging	89
91	Deformazioni con spessore 1mm con simple averaging	89
92	Deformazioni con spessore 0.7mm senza averaging	89
93	Deformazioni con spessore 0.7mm con simple averaging	90
94	Deformazioni con spessore 13mm senza averaging	90
95	Deformazioni con spessore 13mm con simple averaging	90
96	Deformazioni con spessore 1mm senza averaging	91
97	Deformazioni con spessore 1mm con simple averaging	91
98	Deformazioni con spessore 0.7mm senza averaging	91
99	Deformazioni con spessore 0.7mm con simple averaging	92
100	Deformazioni con spessore 13mm senza averaging	92
101	Deformazioni con spessore 13mm con simple averaging	92
102	Deformazioni con spessore 1mm senza averaging	93
103	Deformazioni con spessore 1mm con simple averaging	93
104	Deformazioni con spessore 0.7mm senza averaging	93
105	Deformazioni con spessore 0.7mm con simple averaging	94
106	Deformazioni con spessore 13mm senza averaging	94
107	Deformazioni con spessore 13mm con simple averaging	94
108	Tensioni con spessore 1mm senza averaging	98
109	Tensioni con spessore 1mm con simple averaging	98
110	Tensioni con spessore 0.7mm senza averaging	98
111	Tensioni con spessore 0.7mm con simple averaging	99
112	Tensioni con spessore 13mm senza averaging	99
113	Tensioni con spessore 13mm con simple averaging	99
114	Tensioni con spessore 1mm senza averaging	100
115	Tensioni con spessore 1mm con simple averaging	100
116	Tensioni con spessore 0.7mm senza averaging	100
117	Tensioni con spessore 0.7mm con simple averaging	101
118	Tensioni con spessore 13mm senza averaging	101
119	Tensioni con spessore 13mm con simple averaging	101
120	Tensioni con spessore 1mm senza averaging	102
121	Tensioni con spessore 1mm con simple averaging	102
122	Tensioni con spessore 0.7mm senza averaging	102
123	Tensioni con spessore 0.7mm con simple averaging	103
124	Tensioni con spessore 13mm senza averaging	103
125	Tensioni con spessore 13mm con simple averaging	103
126	Spostamenti nel sistema magnitude	107
127	Spostamenti rispetto all'asse X	107
128	Spostamenti rispetto all'asse Y	107
129	Spostamenti rispetto all'asse Z	108

Elenco delle tabelle

1	Comparazione dell'atmosfera sulla Terra e su Marte	13
2	Panoramica profili a basso Re	17
3	Risultati analisi modale spessore 1mm con mesh da 1mm	64
4	Risultati analisi modale spessore 0.7mm con mesh da 1mm	64
5	Risultati analisi modale spessore 1.3mm con mesh da 1mm	65
6	Risultati analisi modale spessore 1mm con mesh da 2mm	65
7	Risultati analisi modale spessore 0.7mm con mesh da 2mm	66
8	Risultati analisi modale spessore 1.3mm con mesh da 2mm	66
9	Risultati analisi modale spessore 1mm con mesh da 5mm	67
10	Risultati analisi modale spessore 0.7mm con mesh da 5mm	67
11	Risultati analisi modale spessore 1.3mm con mesh da 5mm	68
12	Risultati frequenze analisi modale spessore 1mm	68
13	Risultati frequenze analisi modale spessore 0.7mm	69
14	Risultati frequenze analisi modale spessore 1.3mm	69
15	Risultati frequenze analisi modale spessore 1mm	70
16	Risultati frequenze analisi modale spessore 0.7mm	72
17	Risultati frequenze analisi modale spessore 1.3mm	73
18	Risultati analisi lineare - Spostamenti con spessore 0.7mm - 1mm - 1.3mm con mesh da 5mm	86
19	Risultati analisi lineare - Spostamenti con spessore 0.7mm - 1mm - 1.3mm con mesh da 2mm	86
20	Risultati analisi lineare - Spostamenti con spessore 0.7mm - 1mm - 1.3mm con mesh da 1mm	87
21	Risultati analisi lineare - Spostamenti con spessore 10mm con mesh da 5mm, 2mm e 1mm	87
22	Risultati analisi lineare - Spostamenti con spessore 0.7mm con mesh da 5mm, 2mm e 1mm	88
23	Risultati analisi lineare - Spostamenti con spessore 13mm con mesh da 5mm, 2mm e 1mm	88
24	Risultati analisi lineare - Deformazioni con spessore 0.7mm - 1mm - 1.3mm con mesh da 5mm	95
25	Risultati analisi lineare - Deformazioni con spessore 0.7mm - 1mm - 1.3mm con mesh da 2mm	95
26	Risultati analisi lineare - Deformazioni con spessore 0.7mm - 1mm - 1.3mm con mesh da 1mm	96
27	Risultati analisi lineare - Deformazioni con spessore 10mm con mesh da 5mm, 2mm e 1mm	96
28	Risultati analisi lineare - Deformazioni con spessore 0.7mm con mesh da 5mm, 2mm e 1mm	97
29	Risultati analisi lineare - Deformazioni con spessore 13mm con mesh da 5mm, 2mm e 1mm	97
30	Risultati analisi lineare - Tensioni con spessore 0.7mm - 1mm - 1.3mm con mesh da 5mm	104
31	Risultati analisi lineare - Tensioni con spessore 0.7mm - 1mm - 1.3mm con mesh da 2mm	104

32	Risultati analisi lineare - Tensioni con spessore 0.7mm - 1mm - 1.3mm con mesh da 1mm	105
33	Risultati analisi lineare - Tensioni con spessore 10mm con mesh da 5mm, 2mm e 1mm	105
34	Risultati analisi lineare - Tensioni con spessore 0.7mm con mesh da 5mm, 2mm e 1mm	106
35	Risultati analisi lineare - Tensioni con spessore 13mm con mesh da 5mm, 2mm e 1mm	106

Abstract

Questo elaborato si propone di fornire una previsione delle sollecitazioni strutturali di un'elica di un drone per applicazioni spaziali, nello specifico è stato utilizzato il metodo elementi finiti per effettuare un'analisi modale e un'analisi lineare. Nell'elaborato si descrive, in prima battuta, i primi modelli e prototipi di droni per esplorazione spaziale, partendo dai progetti universitari in collaborazione con aziende ed enti spaziali, fino ad arrivare al progetto finale del drone Ingenuity della NASA. Successivamente si è visto come l'atmosfera di Marte influenzi l'aspetto puramente aerodinamico dell'elica e come questo a sua volta abbia delle ripercussioni sulla controparte strutturale. È stata illustrata una panoramica dei profili alari operativi a basso numero di Reynolds che meglio possano soddisfare le dure condizioni dell'atmosfera marziana e quali di questi risultino essere ottimizzati per le condizioni di volo. Le analisi sono state eseguite attraverso l'utilizzo del software Altair Hyperworks e per questo motivo è stato ritenuto opportuno descrivere in maniera dettagliata gli elementi principali che compongono tale software, quali fattori influenzino la creazione delle diverse mesh generate e il procedimento utilizzato per la creazione di quest'ultime e per effettuare l'analisi agli elementi finiti. È stato descritto inoltre il processo di correzione e ottimizzazione delle mesh 2D e 3D che caratterizzavano il modello, indicando anche in questo caso gli elementi e i criteri che influenzano il processo. Queste simulazioni, effettuate con un grado di accuratezza sempre più elevato, hanno permesso di visualizzare graficamente e a livello di risultati numerici ciò che emergeva dall'analisi teorica effettuata sui profili alari.

Introduzione

Il design e la progettazione di sistemi di volo senza pilota (UAS, unmanned aerial systems) dedicati all'esplorazione spaziale è un argomento di forte interesse nel settore aerospaziale, soprattutto dopo i numerosi successi, oltre le aspettative iniziali, dell'ormai famoso drone Ingenuity della NASA.

Questo progetto di tesi raccoglie l'eredità di un progetto di ricerca interno del Politecnico di Torino, basato sul lavoro del dottorando Manuel Carreno Ruiz e del professor Domenic D'Ambrosio, nel quale viene analizzata e ottimizzata dal punto di vista aerodinamico l'elica di un rotore con operatività nell'atmosfera marziana. Il progetto di tesi nasce per fornire un'accurata misura delle sollecitazioni strutturali per completare in merito all'analisi aeromeccanica lo studio dell'elica e per presentare eventuali nuove informazioni utili all'ottimizzazione dal punto di vista strutturale del modello iniziale.

Nella parte iniziale del progetto sono stati descritti i primi progetti riguardanti droni atti all'esplorazione spaziale, siano essi universitari che presentati da enti o agenzie spaziali dedicate. È stato presentato un breve confronto tra l'atmosfera terrestre e quella marziana al fine di comprendere i motivi degli studi effettuati e per capire le difficoltà e le sfide che comporta la progettazione e il design di un sistema propulsivo in un ambiente diverso da quello presente sulla Terra.

Successivamente sono stati analizzati dal punto di vista puramente teorico i comportamenti e come le caratteristiche geometriche e superficiali dei diversi profili alari influenzassero le prestazioni in un ambiente con densità e numero di Reynolds molto bassi. Sempre in termini teorici è stato visto come tali fattori possano essere sfruttati a vantaggio dell'ottimizzazione aerodinamica e/o strutturale e quali di questi fossero rilevanti al fine di raggiungere le prestazioni ottimali nel range di Reynolds desiderato.

È stata poi dedicata attenzione ad un esempio pratico di analisi strutturale attraverso il software Altair HyperWorks, lo stesso utilizzato per questo progetto di tesi, effettuato dal Beijing Institute of Technology [6] in cui è stata scelta proprio l'elica del drone Ingenuity come oggetto di studio. Conseguentemente si è dato spazio ad una descrizione di cosa costituisce l'analisi agli elementi finiti e di come venga impiegata nel mondo moderno per effettuare simulazioni anche al di fuori del settore aerospaziale.

Nella parte successiva si è passati alla descrizione dell'interfaccia generale del programma, di quale tipo di solutore sia stato scelto, di come si possa manipolare e correggere il modello CAD importato. Una volta terminata questa fase preliminare si è passati alla generazione della mesh in 2D e in 3D a seconda della zona del modello interessata, sono state delineate tutte le principali scelte effettuate e come queste influiscano sulla creazione della mesh stessa.

Una volta terminata questa fase si è passati alla correzione e all'ottimizzazione della mesh generata, facendo particolare attenzione a descrivere come e quali parametri influenzino il processo di ottimizzazione. È stato visto inoltre come le diverse possibilità di correzione con algoritmo automatico e manuale non sempre portano ad un risultato ottimizzato ma occorre fare capo all'esperienza maturata, ricorrendo ad entrambi i metodi, mettendo in atto un processo iterativo, al fine di ottenere un risultato soddisfacente.

Una volta terminata la fase di creazione della mesh sono stati impostati i diversi parametri associati ad essa, caratterizzando i materiali e le loro proprietà, imponendo le condizioni al contorno e delineando la fase di processing con distinzione tra analisi modale e analisi lineare.

La fase successiva è stata quella di post-processing ed elaborazione dei dati ottenuti come output dalla simulazione, è stato possibile visualizzare graficamente e a livello numerico i risultati ottenuti e in alcuni casi è stato possibile estrapolare un flusso video che risulta essere la soluzione che meglio rappresenta a livello visivo l'esito dell'analisi ottenuto. In particolare nell'analisi modale è stata ottenuta la tabella delle frequenze e gli autovalori ad essa associati, mentre nell'analisi lineare sono state visualizzate a livello grafico le soluzioni riguardanti le tensioni e le deformazioni.

1 Droni per esplorazione spaziale

1.1 NASA's Ingenuity Mars Helicopter

I droni o in generale i velivoli robotici aumentano la portata di terreno che può essere esaminata, se comparati con i tradizionali rover e lander e hanno più potenzialità e funzionalità in prossimità della superficie rispetto agli orbiter. La mobilità aerea è una possibilità molto promettente per l'esplorazione spaziale in quanto riduce le difficoltà, causate dagli ostacoli naturali del terreno, che mettono alla prova i veicoli di terra. Il primo e unico utilizzo di un velivolo a rotore per una missione planetaria è rappresentato dal Mars Helicopter, più comunemente noto col nome Ingenuity, impegnato nella missione Mars 2020 in coppia con il rover Perseverance. Ingenuity non è considerato a tutti gli effetti un punto di arrivo, quanto una dimostrazione a livello tecnologico che l'esplorazione aerea di un altro pianeta sia possibile, un progetto che ha come obiettivo quello di testare nuove funzionalità per la prima volta nella storia, con propositi limitati. Le precedenti dimostrazioni tecnologiche pionieristiche a cui è possibile paragonarlo sono il rover Mars Pathfinder Sojourner e il piccolo CubeSat Mars Cube One (MarCo) che è stato lanciato nel 2018. Essendo Ingenuity una dimostrazione tecnologica, non è stato ritenuto necessario progettarlo con l'intento di raccogliere dati scientifici, infatti a bordo non sono presenti strumentazioni scientifiche dedicate, fatta eccezione per due fotocamere e i sensori dedicati allo svolgimento corretto della missione di volo.

Il design del drone Ingenuity è principalmente costituito da quattro elementi:

- la fusoliera di forma rettangolare dalle misure $136 \text{ mm} \times 195 \text{ mm} \times 163 \text{ mm}$, al cui interno sono presenti le batterie;
- l'avionica, i sistemi di controllo, i sensori e le fotocamere;
- il rotore coassiale contro-rotante dal diametro di 1.21 m costituito da due pale in fibra di carbonio;
- i quattro supporti per l'atterraggio anche questi costituiti da piccoli tubi in fibra di carbonio lunghi 384 mm; il pannello solare presente sopra il rotore per ricaricare le batterie presenti all'interno della fusoliera con annessa antenna per le comunicazioni.



Figura 1: Design di Ingenuity

1.2 I precursori di Ingenuity

Le ottimizzazioni delle performance aerodinamiche del drone sono state effettuate con particolare cura ed attenzione su profili alari disegnati appositamente per l'atmosfera marziana. Tali profili sono stati infatti ottimizzati e messi a punto per contrastare il basso numero di Reynolds e l'elevato numero di Mach inerenti all'operazione di volo su Marte. Il design strutturale del rotore è stato sviluppato con riferimento alla frequenza delle pale e alla minimizzazione dei pesi, rispettando i parametri di resistenza del materiale nei range di sicurezza richiesti. Sono stati effettuati diversi studi e presentati svariati progetti prima di arrivare al design finale del drone Ingenuity, quali ad esempio quelli di Young e Aiken [1] sull'esplorazione aerea di corpi planetari e in risposta ad una competizione universitaria sponsorizzata dalla NASA, molteplici progetti sono stati sviluppati con ottimi risultati.

Tra i più importanti occorre citare l'Università del Maryland e il Georgia Institute of Technology, il velivolo dell'Università del Maryland, MARV, è stato progettato con un peso di 50 kg, un rotore dal diametro di 4.26 m, un range di 25 km e un'autonomia di 39 minuti. Il drone del Georgia Institute of Technology invece era caratterizzato da un peso di 10 kg con un rotore dal diametro di 1.84 m e un'autonomia di 30 minuti. Ulteriori progetti degni di nota sono rappresentati da quelli realizzati dal Delft University of Technology e la Tohoku University.



Figura 2: Design dei droni marziani MARV, GTMARS, MEUAV, VITAS, JMH

1.3 L'atmosfera di Marte

Le possibilità di volo su Marte sono influenzate da un aspetto caratterizzante della sua atmosfera, la bassissima densità di quest'ultima infatti impatta fortemente su prestazioni e dinamiche di volo. La tabella 1 compara le caratteristiche dell'atmosfera di Terra e Marte. Sul pianeta rosso la densità dell'aria è circa l'1% comparata a quella terrestre con una variazione compresa tra 0.010 and 0.020 kg/m^3 a seconda di vari fattori in primis l'elevazione del terreno e successivamente variazioni giornaliere e annuali, causate da fenomeni naturali. A causa della bassa densità, il numero di Reynolds di un profilo alare di un rotore ottimizzato per operazioni su Marte è compreso nel range che va da 10000 a 25000, con un considerevole impatto sul comportamento del profilo alare. La composizione dell'atmosfera marziana è costituita per la maggior parte da anidride carbonica e a causa delle proprietà di questo gas si ha una più bassa velocità del suono rispetto all'atmosfera terrestre, composta principalmente da azoto e ossigeno e a peggiorare tale situazione occorre considerare le basse temperature che intensificano ulteriormente il problema. L'atmosfera a bassa densità di Marte riduce il rapporto area portante per ala che può essere prodotta da un rotore, il basso numero di Reynolds riduce il coefficiente massimo di portanza e aumenta il coefficiente di resistenza dei profili alari. La forma ottimale dei profili alari è molto diversa rispetto a quella caratteristica dei profili ad alto numero di Reynolds, inoltre per un dato numero di Mach, la più bassa velocità del suono dell'atmosfera marziana riduce la velocità massima possibile al tip dell'ala del rotore.

		Terra (N_2+O_2)	Marte (CO_2)
Densità, ρ	$[kg/m^3]$	1.225	0.017
Temperatura, T	$[C]$	15	-50
Viscosità, μ	$[Ns/m^2]$	0.0000175	0.0000113
Velocità del suono, a	$[m/s]$	340.3	233.1
Velocità al tip, V_{tip} (M=0.7)	$[m/s]$	238	163
Numero di Reynolds, Re (M=0.5 corda=0.1m)		1297000	19100

Tabella 1: Comparazione dell'atmosfera sulla Terra e su Marte

1.4 Profili alari ottimizzati per basso numero di Reynolds

L'operabilità del rotore in un'atmosfera differente da quella terrestre ha portato gli ingegneri coinvolti nel progetto a ottimizzare i profili alari per un basso numero di Re, come evidenziato dalle caratteristiche dell'atmosfera su Marte. È stata effettuata un'accurata selezione di profili alari per un possibile impiego su un rotore con operabilità in atmosfera marziana e il lavoro effettuato da Koning [2] riassume le informazioni disponibili e le performance annesse a tali profili.

Il basso numero di Reynolds del Mars Helicopter influenzato dalla sua piccola corda e di conseguenza una superficie dell'ala limitata, porta ad avere rapporti portanza/resistenza molto bassi. Sotto valori di Reynolds pari a $Re=100000$, lo stato dello strato limite può essere sub-critico, il flusso è considerato tale se lo strato limite di una forma affusolata è laminare nel range considerato degli angoli d'attacco. Il numero di Reynolds al quale lo strato limite inizia a presentare caratteristiche turbolente è considerato il numero di Reynolds critico, funzione di forma della sezione, coefficiente di portanza, circuitazione, fattori esterni e la rugosità della superficie.

McMasters and Henderson [3] offrono una selezione e una panoramica delle prestazioni di profili alari sperimentali su un ampio spettro di numeri di Reynolds. Le figure 3 e 4 mettono in evidenza la variazione del coefficiente di portanza/resistenza in correlazione alla sezione massima, all'angolo di attacco e al numero di Reynolds.

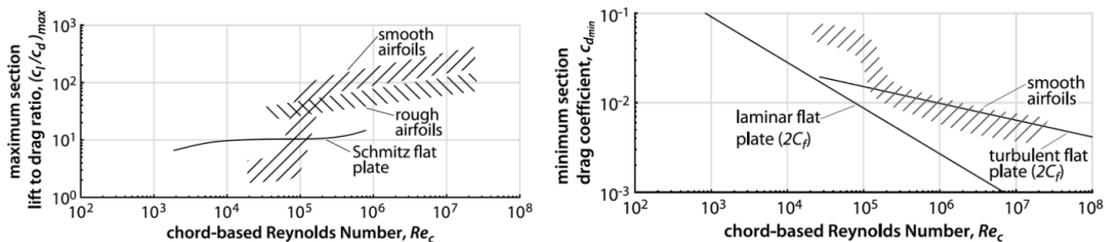


Figura 3: Variazione del coefficiente di portanza e resistenza in relazione alla sezione massima e al Re

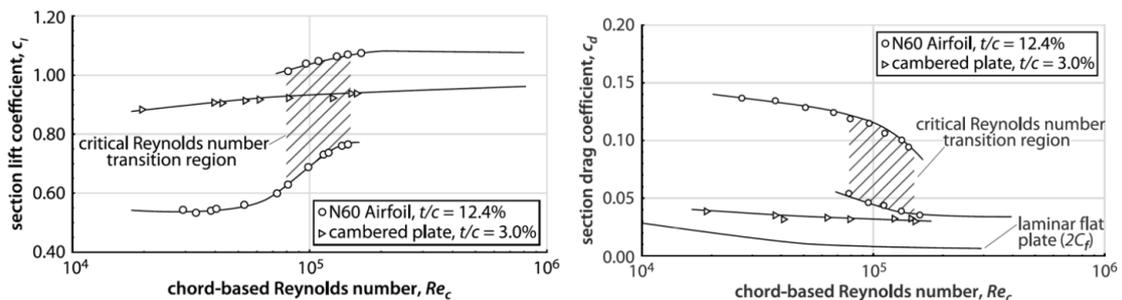


Figura 4: Variazione del coefficiente di portanza e resistenza in relazione all'angolo di attacco e al Re

È possibile notare un grosso calo di prestazioni nell'intorno di $Re = 100000$, con attenzione ai profili alari caratterizzati da alta rugosità, che hanno migliori performance a numeri di Reynolds leggermente più bassi, ciò è possibile in quanto la rugosità della superficie contribuisce ad una transizione ottimale dello strato limite. Il decadimento delle prestazioni per il valore $Re = 100000$, ma più in generale per bassi valori di Re , è attribuibile in maniera significativa all'aumento del coefficiente di resistenza nel range del Re critico.

Nel regime di basso numero di Re , lo strato limite può essere laminare anche dopo il punto di pressione di recupero, esso infatti non incontra una sufficiente amplificazione del disturbo della corrente tale da innescare una transizione in tempo reale e il flusso turbolento non riesce a ricollegarsi alla superficie dopo la separazione laminare. Lo strato limite laminare porta con sé pochissima quantità di moto nei pressi della superficie e quindi non riesce a sopportare un gradiente avverso di pressione senza separarsi. Tale separazione causa un elevato aumento della componente di pressione legato alla resistenza. Inoltre, strati limite caratterizzati da uno spessore relativamente elevato, a bassi numeri di Re , riducono l'effettiva curvatura del profilo alare, riducendo il coefficiente di portanza massimo ottenibile, specialmente nel caso in cui lo strato limite separato non riesce più ad attaccarsi alla superficie.

Lo strato limite turbolento mostra perdite totali significativamente più elevate ma valori di resistenza alla pari dello strato limite laminare. Tuttavia lo strato limite turbolento ha una velocità in prossimità della superficie del corpo più elevata e una quantità di moto superiore, fattori che contribuiscono alla possibilità di ottenere pressioni più elevate prima della separazione, ciò si esprime in performance dei profili alari più elevate, soprattutto nello stato supercritico.

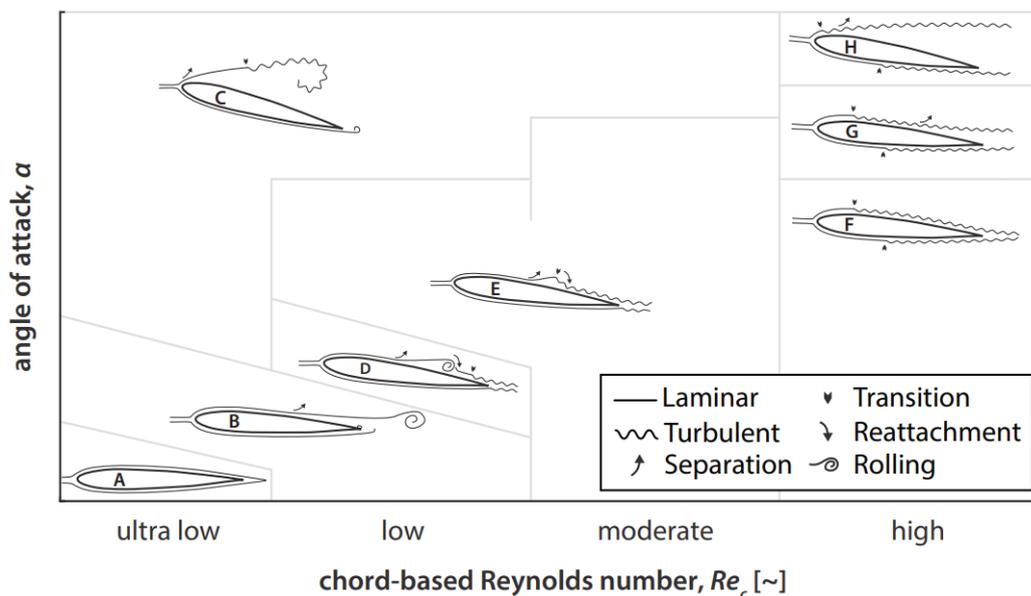


Figura 5: Andamento del flusso attorno al profilo all'aumentare del Re

1.4.1 I profili corrugati e la distribuzione di spessore

Un aspetto interessante è rappresentato dalle performance dei profili corrugati, che potrebbero essere potenzialmente indipendenti dal numero di Reynolds in quanto si impone la formazione delle zone di separazione in posizioni fissate. Applicando gli stessi parametri utilizzati per i profili alari lisci, ci si aspetta che la sensibilità al Reynolds, alle turbolenze del flusso e alle condizioni relative all'ambiente operativo sia molto bassa. Le prestazioni di tali profili sono tuttavia considerate competitive nei confronti dei profili alari analizzati solo nella regione bassa del range di Reynolds considerata.

Dal punto di vista strutturale invece è possibile notare che i requisiti richiesti, quali, rigidezza torsionale e flessionale risultano essere più competitivi rispetto ai profili lisci e inarcati, soprattutto nella regione interna del rotore, dove sono presenti le regioni di flusso con Re più bassi. Alcuni esempi sono I profili alari detti dragonfly, analizzati da Levy e Seifert [4] sia utilizzando la fluidodinamica computazionale (CFD) sia la sperimentazione classica in un flusso continuo indisturbato, questi profili offrono prestazioni promettenti in Re_c compresi nel range tra 2000 e 8000

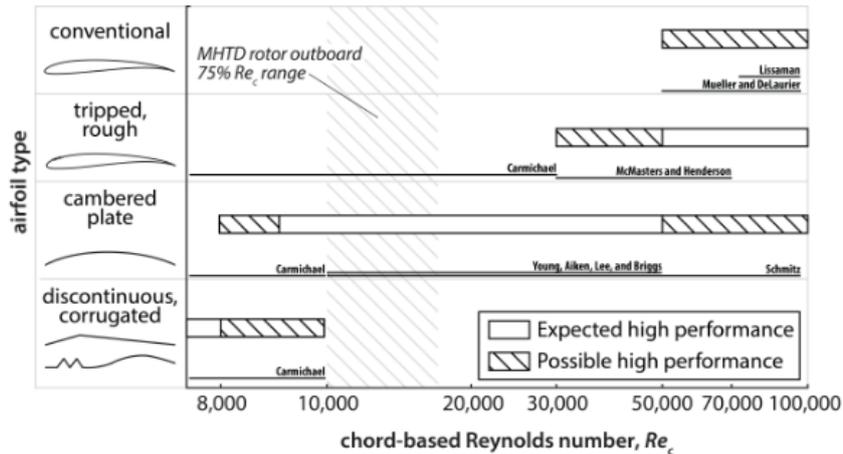


Figura 6: Performance dei diversi tipi di profili alari in relazione al Re

Un altro importante oggetto di studio riguardante i profili ottimizzati a basso numero di Reynolds è la distribuzione dello spessore lungo le varie direzioni del profilo. L'effetto della distribuzione di spessore non lineare in un profilo inarcato o in profili alari di tipo discontinuo, infatti, può portare ad una rigidezza torsionale e flessionale migliore per un particolare set di geometrie che risulta essere intrinsecamente debole punto di vista strutturale. Questa soluzione apre nuovi scenari dal punto di vista dell'impiego di una nuova famiglia di profili alari dalla forma poligonale, ad esempio triangolari o a forma di diamante, come analizzato da Munday e altri [5].

Nella tabella 2 è illustrata una panoramica delle performance dei vari profili che è possibile scegliere per Re molto bassi.

Geometria del profilo	Sensibilità (Re e turbolenze)	Isteresi	Utilizzi	Commenti
Profilo di tipo convenzionale	Possibile elevata sensibilità	Isteresi possibile (separazione flusso laminare indotta dalla formazione di una bolla)	Se si rimane fuori dalla regione a numero di Reynolds critico è possibile l'utilizzo per piccoli velivoli senza pilota (UAVs)	Funzionamento affidabile con Re basso, garantita la transizione dello strato limite, come nel Mars Helicopter Technology Demonstrator (MHTD)
Profilo ruvido o tripped	Se la transizione dello strato limite è fissata la sensibilità è minima	Isteresi possibile se la bolla si crea prima della zona dell'inserito	Difficile che l'inserito sia funzionale per Re inferiori a 30000; Incertezza di isteresi per Re minori di 100000	La transizione dello strato limite deve essere garantita per evitare l'insorgere di imprevedibili dinamiche di volo
Profilo di tipo incurvato	La separazione frontale per elevati angoli d'attacco riduce la sensibilità	Isteresi molto improbabile a causa della separazione frontale	Utilizzato per piccoli UAV o veivoli con pilota (MAVs)	Possibili problemi di rigidità dovuti al basso rapporto corda/spessore profilo
Profilo corrugato	La zona di separazione nelle superfici corrugate può ridurre la sensibilità	Isteresi meno probabile per la separazione nelle zone corrugate	Nessun utilizzo pratico su rotori sperimentato	Prestazioni davvero competitive per Re inferiori a 10000
Profilo poligonale	La separazione nelle discontinuità può ridurre la sensibilità	Isteresi meno probabile per la separazione nelle zone discontinue	Nessun utilizzo pratico su rotori sperimentato	Possibile riduzione dei problemi di rigidità rispetto ai profili incurvati

Tabella 2: Panoramica profili a basso Re

1.5 La struttura dei profili alari

La struttura dei profili del rotore di Ingenuity è stata disegnata attraverso il software CAD CATIA e analizzata successivamente dall'Università del Maryland utilizzando un codice agli elementi finiti tridimensionale chiamato X3D.

È stato possibile calcolare lo stress e le deformazioni della struttura durante il carico rotazionale e sono state ottenute le frequenze naturali di vibrazione. L'obiettivo dell'analisi è stato quello di definire la struttura interna delle pale, identificare lo spessore alla radice della pala che soddisfacesse i requisiti strutturali e stimare i pesi dell'hub e delle pale stesse.

I carichi aerodinamici sulle pale sono piccoli a causa della bassa atmosfera presente su Marte, ciò si traduce in una minore rigidezza necessaria a soddisfare i requisiti di carico e stabilità rispetto ai rotori progettati per operazioni in atmosfera terrestre con il risultato finale che si possono sfruttare nuove opportunità per design innovativi a livello strutturale per minimizzare il peso.

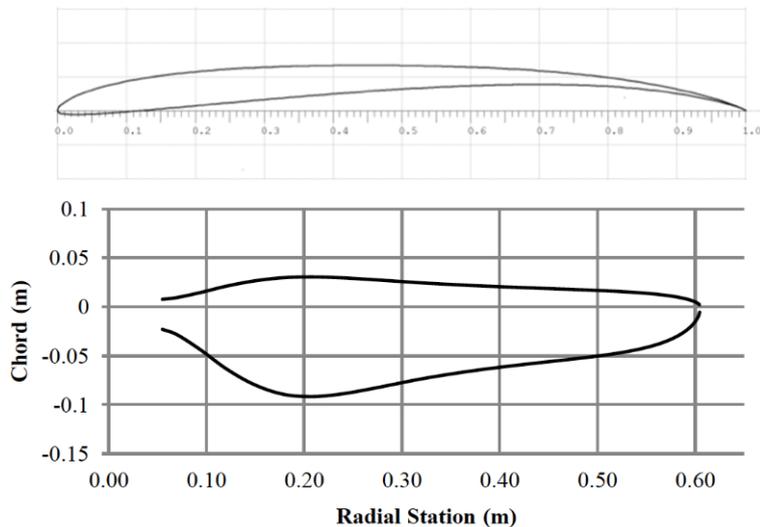


Figura 7: Il profilo alare del drone Ingenuity

Come specificato in precedenza la bassa densità dell'atmosfera marziana permette ad un rotore, a parità di dimensioni, una spinta disponibile inferiore rispetto alle condizioni dell'atmosfera terrestre e di conseguenza è richiesta una maggiore potenza. Per questo motivo, come fattore critico, il peso totale del velivolo deve essere il più basso possibile. La scelta più semplice e logica è quella di ridurre il peso del sistema di pale, rispetto a ridurre quello dell'elettronica, soprattutto se come in questo caso è composta solo da strumenti di bordo essenziali ed elementi per il controllo del velivolo.

Per garantire delle prestazioni ottimali nell'ambiente operativo marziano, un sistema di pale deve possedere un sufficiente rapporto portanza/peso, per questo motivo un design ultraleggero è essenziale al fine di soddisfare i vincoli imposti dalla generazione di portanza e allo stesso tempo contenere il peso. Per rispettare tali vincoli è stata adottata una

struttura di tipo sandwich, con lo strato interno (core) costituito da un materiale di tipo polimerico espanso e i due strati esterni in fibra di carbonio come evidenziato dalla Figura 8.

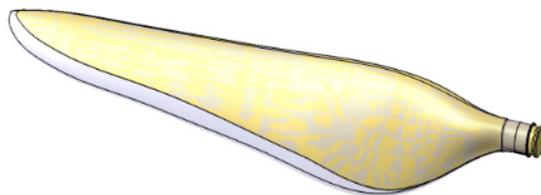


Figura 8: Il modello della struttura del profilo alare del drone Ingenuity

La parte in giallo è il core in schiuma rigida espansa a cella chiusa di Polimetacrilimmide (PMI) e la parte grigia è quella ricoperta da fibra di carbonio di tipo T300. La superficie dell'intero corpo dei profili alari è 0.098 m^2 e sono stati effettuati dei rinforzi dal punto di vista dello spessore alla radice del profilo per assicurare la robustezza degli stessi. La densità del tessuto pre-preg (composito fibro-rinforzato "pre-impregnato") è di 1600 kg/m^3 , lo spessore del singolo strato è di 0.2mm e le direzioni delle fibre del reticolato sono $0/90/45$. Il peso totale della singola pala è di circa 100g con 3 strati di rivestimento in fibra di carbonio. Nonostante la struttura a sandwich abbia permesso di ridurre in grande misura il peso del sistema di pale del rotore marziano, per soddisfare i requisiti di un design ultraleggero sono state inevitabilmente ridotte la resistenza e la rigidezza dei profili alari. Per questo motivo prima della costruzione, questi sono stati calibrati e ottimizzati attraverso analisi agli elementi finiti come quella di Zhang [6] e altri nel Vehicle Research Center, BIT attraverso Hypermesh e l'Università del Maryland con il software X3D. In particolare nello studio di Zhang è stata effettuata una simulazione combinata tra Hypermesh e Nastran per verificare le deformazioni e eventuali zone critiche per il profilo alare. Il modello agli elementi finiti è presente nella Figura 9.

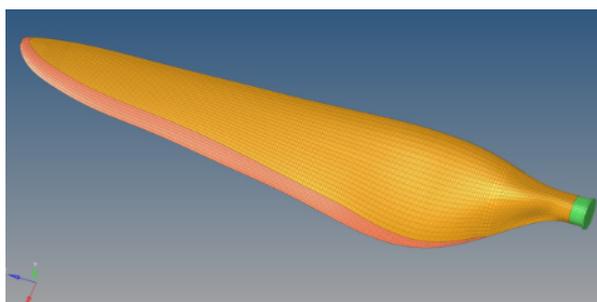


Figura 9: Il modello agli elementi finiti del profilo alare del drone Ingenuity

In questo studio è stato simulato il carico aerodinamico (forza aerodinamica sviluppata a 3000 RPM e angolo di attacco di 10° in atmosfera marziana che si sviluppa sulla superficie del profilo delle pale. È possibile vedere nelle Figure 10 la distribuzione della deformazione e nella Figura 11 le zone critiche del profilo nello strato in fibra di carbonio. Dai risultati sulla deformazione si può osservare che la deformazione principale è

concentrata al tip del profilo alare e la deformazione massima ottenuta è di 19.8mm, che rapportata alle dimensioni del rotore, rappresenta solo il 3.3% del raggio del sistema di pale del drone marziano. Ciò significa che il requisito di robustezza è stato soddisfatto. Per quanto riguarda il bordo di fuga del profilo, esso è particolarmente sottile ed è fortemente influenzato dai vortici di scia che vengono generati durante una rotazione ad alta velocità. Per questo motivo esso è considerato una zona critica e occorre valutare il failure factor. Dalle simulazioni viene confermato che la zona critica è effettivamente coincidente con il bordo di fuga ma il failure factor massimo calcolato è 0.11. Essendo molto minore di 1, significa che la rigidità del profilo alare ha un surplus e potrebbe sostenere carichi aerodinamici maggiori prima di rientrare nei range di sicurezza critici.

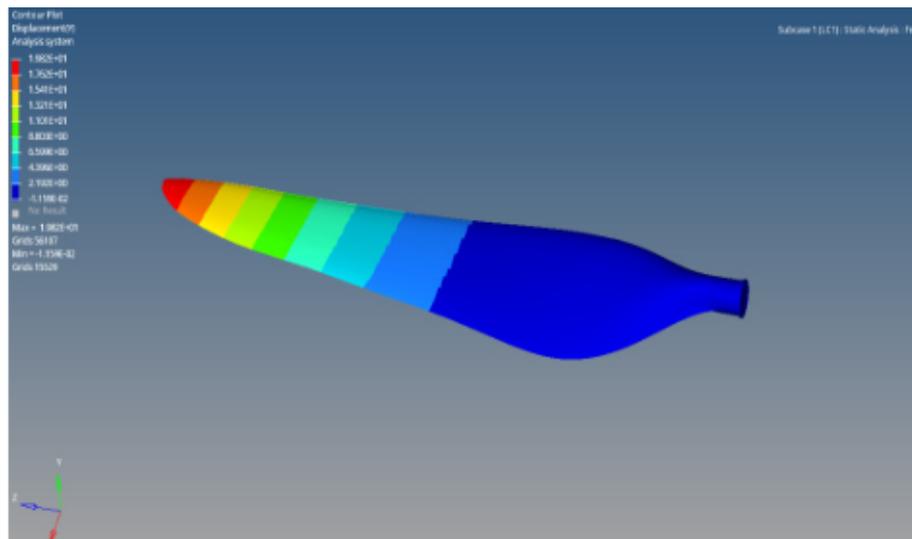


Figura 10: Le deformazioni del profilo

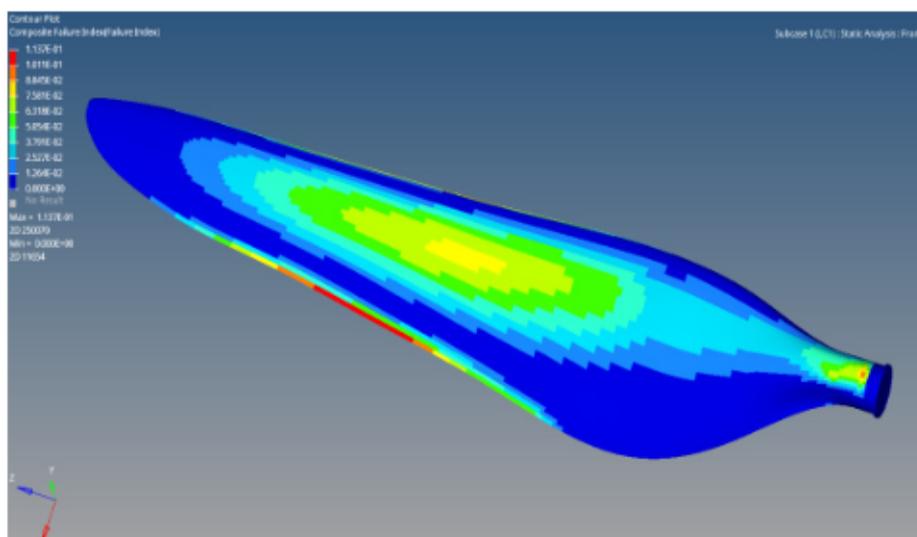


Figura 11: Il failure factor

2 Analisi F.E.A.

L'analisi agli elementi finiti (F.E.A. acronimo di Finite Element Analysis) è una tecnica di risoluzione e simulazione al computer usata nelle analisi di problemi di tipo ingegneristico. Essa sfrutta il Metodo degli elementi finiti (o FEM), una tecnica di analisi numerica che si pone come obiettivo la ricerca di soluzioni in forma discreta o approssimata di problemi descritti da equazioni differenziali alle derivate parziali (o PDE).

Nonostante in alcuni ambiti limitati esso venga sostituito o integrato con altre tecniche di risoluzione numerica (Metodo delle differenze finite, Metodo dei volumi finiti, Metodo degli elementi al contorno, metodo delle celle, Metodo spettrale), il metodo agli elementi finiti risulta comunque uno dei più utilizzati e rappresenta il fondamento di una buona parte dei codici di analisi a disposizione in commercio.

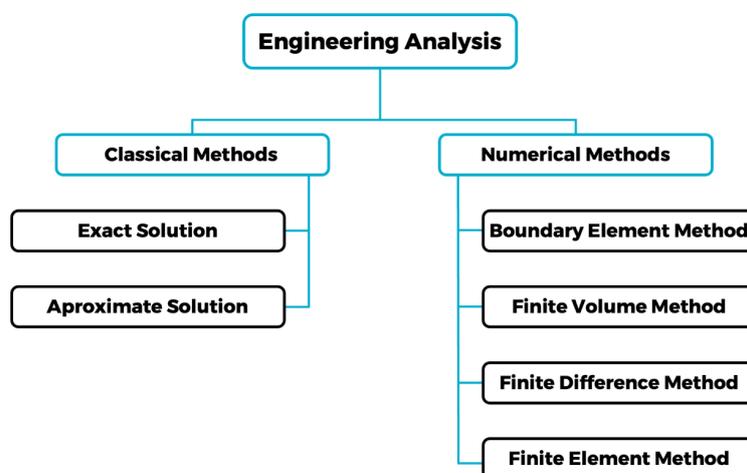


Figura 12: Metodi matematici per l'analisi ingegneristica

Per la maggior parte dei problemi e delle geometrie, fatta eccezione per casi molto particolari, le equazioni differenziali alle derivate parziali non possono essere risolte tramite approccio analitico. È possibile invece approssimare queste equazioni attraverso dei metodi di discretizzazione che poi successivamente vengono risolti utilizzando dei metodi numerici. Di conseguenza, le soluzioni che si ottengono sono a loro volta un'approssimazione della soluzione reale di queste PDE.

Il metodo agli elementi finiti è uno strumento di approssimazione che suddivide uno spazio complesso o un dominio in un numero piccolo, numerabile e finito di intervalli, il cui comportamento può essere descritto con equazioni relativamente semplici, se comparate con quelle alle derivate parziali.

Il metodo FEM è stato sviluppato per modellare ed effettuare analisi di sistemi complessi nel campo dell'ingegneria meccanica, civile e aeronautica. Ne consegue che può ricoprire gli utilizzi più disparati: dalla meccanica strutturale di differenti sezioni di un automobile sotto diversi carichi, al flusso di calore in alcune sezioni di un motore, oppure la distribuzione delle radiazioni elettromagnetiche di una semplice antenna.

2.1 Fasi dell'analisi

L'analisi agli elementi finiti si differenzia in tanti step ma è possibile individuare 3 macrofasi del processo di risoluzione del problema:

- il **pre-processing** durante il quale viene costruito il modello ad elementi finiti
- il **processing** durante il quale viene effettuata l'analisi e risolto il problema agli elementi finiti
- il **post-processing** durante il quale è possibile elaborare la soluzione e rappresentarla graficamente

Il pre-processing è anche detto preparazione del modello ed è solitamente la parte più intensa a livello lavorativo di tutta l'analisi agli elementi finiti.

Esso a sua volta si divide in diversi passaggi, in primis occorre scegliere la tipologia di analisi da effettuare (analisi dinamica/statica/termica, lineare/nonlineare, dipendente dal tempo, ecc.), successivamente è necessario scegliere il tipo di elementi finiti (1D, 2D, 3D, di tipo asta/trave/piastra/guscio). Fondamentali sono le scelte della definizione del reticolo dei nodi della mesh, le proprietà ad esse associate (ad esempio i parametri costitutivi dei materiali) e le condizioni di carico e di vincolo.

Il post-processing è la parte in cui i risultati del solutore vengono elaborati e resi interpretabili per l'utente finale, sarebbe altrimenti quasi impossibile e soprattutto incredibilmente laborioso a livello di tempo dedicato decodificare i risultati numerici dell'output e assegnarne un significato.

Il post-processing elabora la soluzione e la rappresenta, solitamente a livello grafico, per avere un approccio più user-friendly e una percezione visiva completa e facilmente interpretabile. Esso è basato su un altro tipo di output solitamente di tipo testuale, che è possibile identificare come il risultato grezzo dell'analisi. La soluzione si divide nella rappresentazione sia nelle quantità fondamentali ad esempio, gli spostamenti se si lavora nell'ambito strutture) sia delle quantità da esse derivate, relative alla fisica del problema preso in analisi (ad esempio le tensioni).

È importante sapere che non è sufficiente accettare le immagini elaborate dall'analisi e accettarle come ottimo risultato, bisogna tenere conto delle conoscenze accademiche e applicare un'analisi personale di tipo critico per capire se i risultati ottenuti hanno senso e sono fisicamente accurati.

Nei software commerciali, sia il pre-processing che il post-processing utilizzano un'interfaccia grafica per rendere l'interazione con l'utente più facile ed intuitiva.

3 Pre-Processing

Tra la moltitudine di software per l'analisi agli elementi finiti si è scelto di utilizzare la suite Altair HyperWorks e in particolare il solutore Altair OptiStruct

3.1 Interfaccia di Hyperworks

L'interfaccia del programma si presenterà come in Figura 13. È possibile suddividere tale interfaccia in 3 principali aree lavorative e 3 toolbar di primaria importanza:

- L'Area grafica, ovvero l'area in cui è visualizzato il modello CAD su cui è necessario effettuare l'analisi (indicata in giallo);
- La Tab area, ovvero il pannello dedicato alla suddivisione carichi, proprietà, load-step, geometria, componenti ed elementi del file importato (indicata in rosso);
- L'area di lavoro principale, costituita da diverse sottosezioni e fondamentale per svolgere l'analisi sul modello (indicata in verde);
- la toolbar dei collector, cioè "cassetti" in cui si andranno ad inserire forze, vincoli, proprietà, materiali, etc (indicata in blu);
- la Graphic toolbar, gruppo di comandi che permette di agire in maniera diretta sugli elementi della mesh una volta creata (indicata in viola);
- la Visualization toolbar, la quale interviene sulla visualizzazione del modello (indicata in nero).

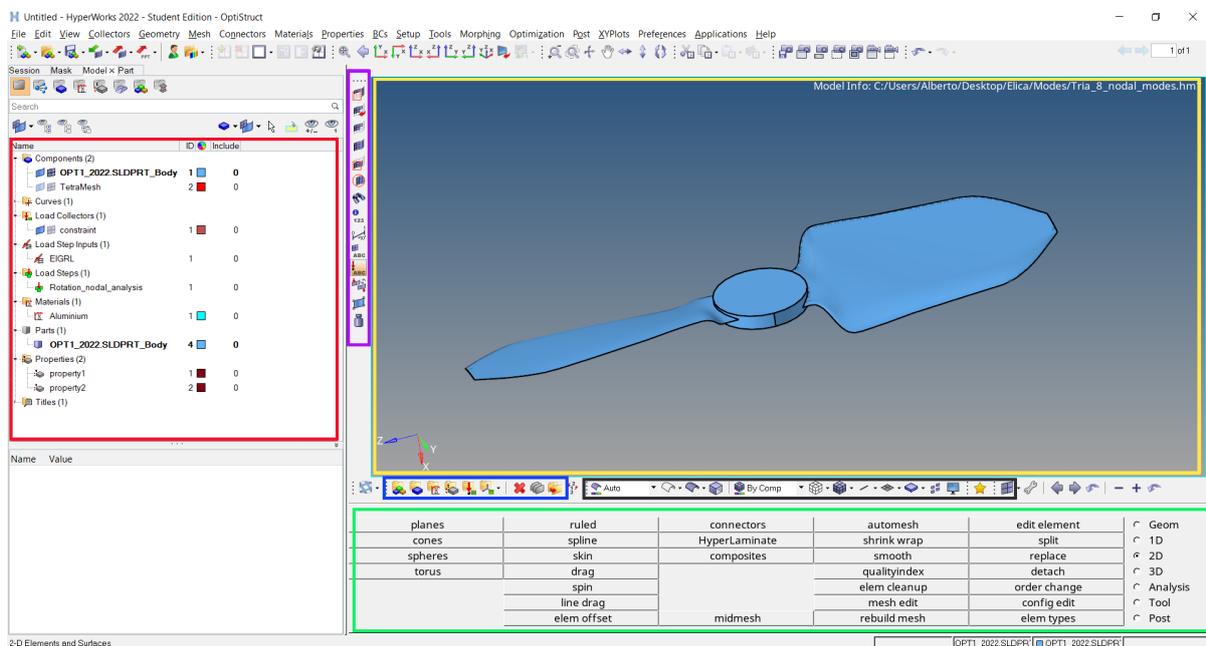


Figura 13: Interfaccia Hyperworks

3.2 Optistruct

Altair Optistruct è un solutore implicito FEA dell'azienda ALTAIR specializzato per il calcolo, sia in condizioni di carico statico che dinamico, di analisi strutturali lineari e non. Optistruct è il solutore adatto all'ottimizzazione dei componenti strutturali, è utilizzato per la soluzione di analisi NVH (noise, vibration & harshness) e per l'analisi modale e la risposta in frequenza. Da oltre vent'anni è uno dei solutori più utilizzati per l'ottimizzazione topologica di strutture leggere e efficienti dal punto di vista del design. Attraverso il suo utilizzo è possibile generare risultati basati su uno spazio di progettazione, obiettivi di performance e restrizioni sul processo di manufacturing definiti dall'utente.

Per le strutture a parete sottile, profili e guarnizioni il solutore Optistruct crea un pattern e determina la posizione ideale per ottenere un ottimale rigidità dei pannelli (se ad esempio si considera l'analisi di piastre sottili) o per la risposta in frequenza. È possibile inoltre utilizzare questo solutore per l'analisi di materiali compositi, la risoluzione di analisi dinamiche delle frequenze, per l'ottimizzazione di modelli multi materiale, l'integrazione di analisi termiche e vibroacustiche in un unico ambiente e per l'analisi di processi failsafe.

I vantaggi sono rappresentati da:

- Velocità e accuratezza
- Possibilità di calcolo su centinaia di core in parallelo
- Gestione memoria RAM usata per la soluzione dei calcoli

Altair Optistruct è stato scelto da aziende che operano in vari settori d'impiego tra cui: industrial, automotive, rail, aerospace e Oil & Gas



Figura 14: Selezione Solutore in Hyperworks

Le applicazioni principali di questo solutore si dividono in cinque campi di interesse:

- **Ottimizzazione per migliorare il Design**

Esistono due tipologie di ottimizzazioni, dimensionale e di forma. Attraverso la prima è possibile determinare le proprietà ottimali dei materiali da utilizzare, effettuare misurazioni e stimare le dimensioni per il campionamento trasversale. L'ottimizzazione di forma di Optistruct invece utilizza variabili di forma generate attraverso il processo di morphing di Altair® HyperWorks® per migliorare un design esistente. Esiste anche un altro tipo di ottimizzazione di forma che rientra nel campo non parametrico, esso produce un profilo o una forma già ottimizzata ma richiede la definizione delle variabili di forma.

- **Materiali innovativi e Processi di produzione avanzati**

Optistruct fornisce un processo a tre fasi per il design dei laminati in composito e un metodo che consente di ottenere la modellizzazione ideale degli stati, il numero ottimale di questi e la sequenza di stacking migliore. Il solutore fornisce inoltre la possibilità di scegliere specifici vincoli tipici dei processi produttivi dell'Additive manufacturing, particolarmente soggetti all'ottimizzazione topologica. Ulteriori applicazioni d'interesse ricadono nelle strutture ultraleggere (extreme lightweight), che necessitano particolari prestazioni a livello termico o richieste specifiche del settore biomedico.

- **Vibrazioni e Acustica**

L'analisi dinamica strutturale include l'analisi modale, la risposta in frequenza (diretta e modale), la risposta in transitorio (diretta e modale), la risposta arbitraria (random response), lo spettro di risposta e la dinamica del rotore. Optistruct include un solutore agli autovalori automatizzato multi-livello (AMSES) che permette accurati studi acustici e vibrazionali e permette di calcolare migliaia di modi vibrazionali con milioni di gradi di libertà attraverso un metodo di risoluzione modale e di risposta in frequenza (FASTFR, acronimo di FAST frequency response).

- **Eventi Non-lineari**

OptiStruct permette la risoluzione di un ampio range di problemi non lineari utilizzando metodi impliciti ed espliciti che includono la simulazione di piccoli e grandi spostamenti, comportamenti non lineari dei materiali e analisi di contatti di tipo complesso. Esso utilizza un'implementazione software che permette di modellizzare la non linearità dell'elasticità della gomma e di altri materiali iper-elastici e un ampio range di soluzioni che va dai materiali elasto-plastici fino ai viscoelastici. È possibile inoltre simulare contatti scorrevoli o di slittamento, le proprietà dei materiali poro-elastici e condizioni particolari di carico come quelle di precarico, buckling e post buckling di tipo statico.

- **Fatica e Vita del componente**

OptiStruct permette di analizzare i componenti a fatica catalogandoli per sollecitazione (curve stress-life) e per deformazione (curve strain-life), differenziando l'analisi in carico uni-assiale e multi-assiale e fornendo un'ottimizzazione topologica

e topografica per forma e dimensione con vincoli sulla fatica definiti dall'utente. Il solutore permette di ottenere un'analisi multi-attributo di un singolo modello con metodi vibrazionali che includono funzioni di test come il sine sweep e la simulazione della fatica vibrazionale casuale.

- **Applicazioni e interazioni in diversi campi della fisica**

Il solutore OptiStruct permette in una singola simulazione, la risoluzione di problemi termici e meccanici e la possibilità di effettuare un'analisi di stress termico transitorio. Esso fornisce inoltre soluzioni a problemi di cinematica e dinamica con carico variabile e stime di sforzo attraverso un metodo di carico statico equivalente (ESLM) permettendo l'ottimizzazione di modelli dinamici multi-body e di modelli a corpo rigido e non. Per ultimo il solutore permette di analizzare interazioni fluido-struttura (nel campo dell'analisi vibro-acustica) e le interazioni termo meccaniche e elettromagnetiche attraverso l'integrazione con solutori dedicati quali Altair CFD Altair® Flux® and Altair® Feko®.

3.3 Il modello CAD

In generale ci sono due metodi per gestire il modello CAD su cui si vuole effettuare l'analisi agli elementi finiti:

- **Creare il modello all'interno del software per analisi FEM.**

Solitamente questo metodo è sconsigliato in quanto le funzionalità relative al disegno geometrico di un software di analisi FEM sono limitate e permettono la creazione e/o la modifica di geometrie piuttosto semplici. Uno strumento che permette la creazione di modelli al suo interno è rappresentato da ABAQUS che all'interno del suo solutore ha delle funzionalità per la gestione della geometria di un modello CAD, la soluzione è comunque incomparabile con un software dedicato al disegno geometrico.

- **Importare il modello**, creato in precedenza su un software dedicato (Creo, Solidworks, CatiaV5 etc.).

Il metodo più utilizzato da aziende e privati, solitamente nelle aziende ci sono team dedicati alla creazione della geometria e team dedicati all'analisi FEM e di conseguenza è la via più efficiente e meno dispendiosa a livello di risorse e tempo.

Questo metodo però presenta un difetto imprescindibile dalla qualità del modello CAD generato e dal software utilizzato, durante l'importazione del modello è molto comune la generazione di errori e piccole imperfezioni da correggere prima della generazione della mesh.

3.3.1 Correzione geometria

Come descritto nella sezione precedente, l'importazione di un modello CAD all'interno di un software per l'analisi FEM genera spesso delle imperfezioni o degli errori che devono essere corretti prima di passare alla generazione della mesh. Le imperfezioni possono essere rappresentate da semplici contorni (linee chiuse) non riconosciuti come tali o in casi particolari errori veri e propri nella geometria.

Essi possono essere corretti in due modi, il primo è correggere la geometria evitando di portare errori sulla mesh generando punti di riferimento errati o imperfezioni se il modello deve risultare particolarmente preciso (soprattutto in zone con dimensioni molto contenute). Il secondo metodo consiste nell'ignorare gli errori di geometria che il programma considera minori (quelli di grossa entità dovranno comunque essere corretti) e applicare le correzioni sulla mesh o durante la sua generazione.

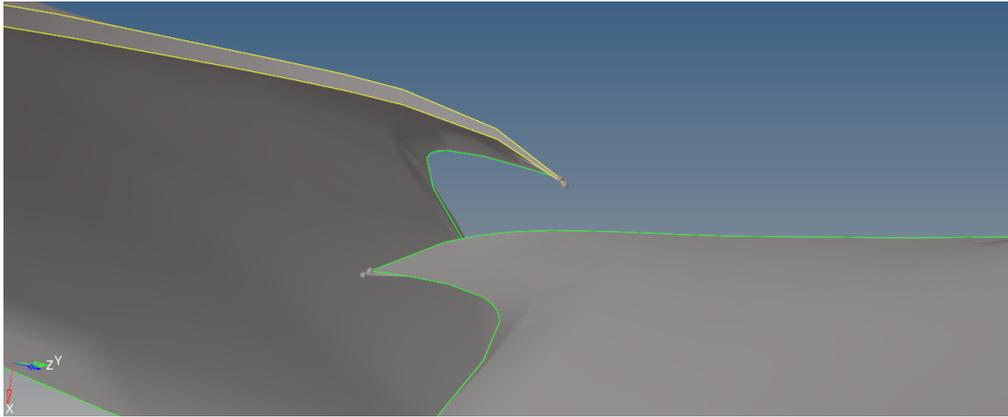


Figura 15: Esempio di errore geometrico dovuto all'importazione del CAD

Il software Altair HyperWorks ci permette di applicare semplici correzioni geometriche attraverso il pannello Geom-Quick edit con delle funzioni basilari quali la divisione delle superfici attraverso punti o linee (split surf-node, split surf-line), il riconoscimento automatico di un contorno attraverso una tolleranza da impostare (toggle edge), l'eliminazione di eventuali superfici e artifici generati erroneamente durante l'importazione, l'aggiunta/rimozione e la proiezione di punti di riferimento (replace, add/remove, release, project point) sulla geometria o sulle linee di quest'ultima per una correzione più accurata.

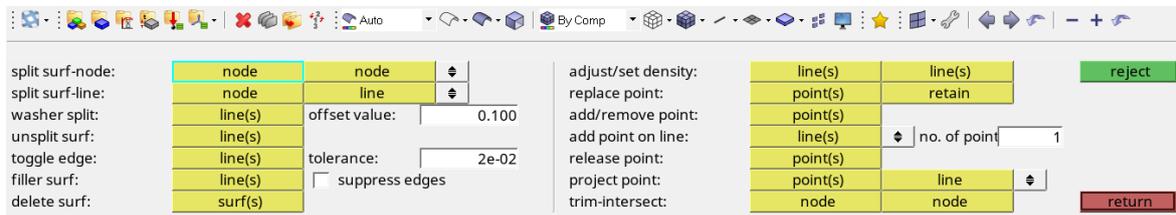


Figura 16: Il pannello Geom-Quick Edit

Nel nostro caso la correzione della geometria si è limitata all'utilizzo del pannello Toggle Edge in quanto alcuni dei contorni della geometria non venivano riconosciuti come linee chiuse, questo potrebbe generare degli errori durante la creazione della mesh in quanto la mancanza di una linea di riferimento potrebbe impedire alla mesh di coincidere con i bordi della geometria da analizzare. Nelle immagini seguenti è illustrata la geometria prima e dopo la correzione effettuata.

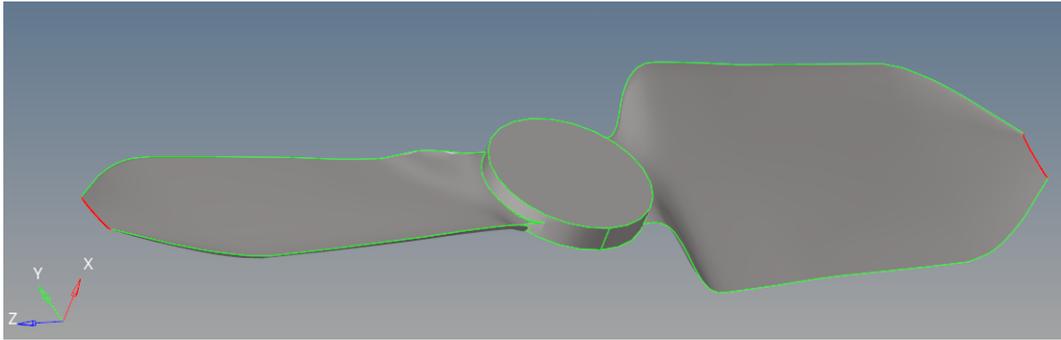


Figura 17: Il modello CAD pre-correzione geometria

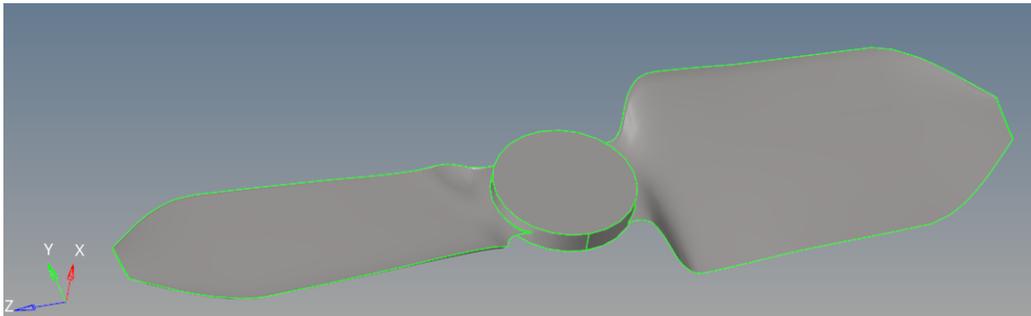


Figura 18: Il modello CAD post-correzione geometria

Come si può notare l'imperfezione è di piccola entità ed è ristretta al bordo finale di entrambi i profili alari, essendo però una zona di interesse per la generazione della mesh si è preferito applicare la correzione in modo tale da evitare problemi nelle fasi successive.

3.4 Generazione della Mesh

Una volta importata e corretta la geometria del modello CAD la fase successiva del Pre-Processing è la generazione della mesh.

Le principali scelte da effettuare prima di iniziare a generare la mesh si dividono in:

- la tipologia di elementi della mesh stessa (1D, 2D, 3D, tria, quad, hexa, etc.);
- l'accuratezza dell'analisi, si possono scegliere elementi al primo ordine o al secondo ordine;
- quanto deve essere fino il reticolo della mesh, che si traduce in, quanto piccoli devono essere gli elementi che la compongono;
- se generare una mesh con reticolo costante oppure più fitta a seconda delle zone di interesse

Per quanto riguarda il nostro modello CAD si è deciso di optare per una mesh 2D per i profili alari e per una TetraMesh per la parte centrale costituita dall'albero.

3.4.1 Mesh 2D

Il primo step della creazione della mesh 2D è l'eliminazione dei solidi che compongono il modello CAD, in modo tale da lasciare un modello composto solo da superfici, sulle quali si andrà a generare la mesh. Lasciare solidi e superfici correlate potrebbe risultare in errori di mesh e generazione di elementi molto piccoli a causa di imperfezioni nell'algoritmo che potrebbe non riconoscere come unite le superfici associate ai solidi. Per evitare questo inconveniente si procede all'eliminazione dei solidi, è possibile farlo in due modi: il primo è attraverso il menù classico nella sezione **Geometry > Delete > Solids** oppure attraverso il comando rapido **F2 (Delete entities)** in entrambi i casi si aprirà nell'area di lavoro principale una sezione in cui occorrerà selezionare l'entità da eliminare (in questo caso solids) e togliere le spunte alle opzioni delete bounding surfs e delete associated elems che andrebbero ad eliminare le superfici associate a tali solidi o eventuali elementi associati ad essi (questo ci è utile durante la generazione della Tetramesh)

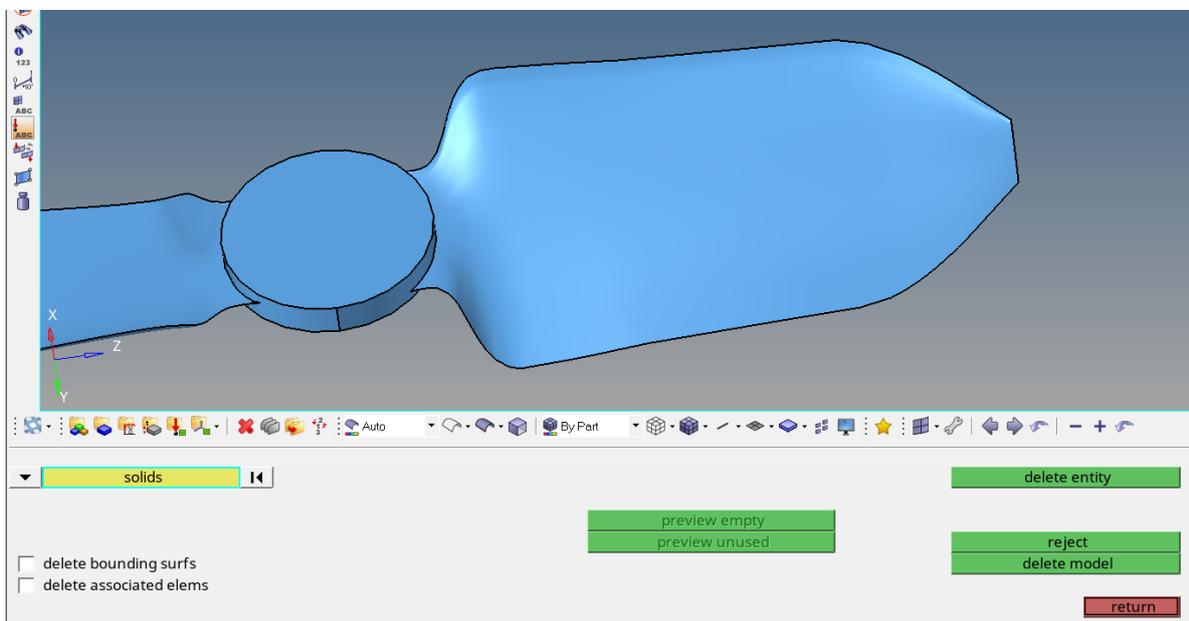


Figura 19: Eliminazione solidi pre-mesh

Una volta selezionati i solidi da eliminare è possibile cliccare su delete entity e completare il processo di eliminazione cliccando su return.

Adesso è possibile passare alla generazione della Mesh 2D, anche in questo caso si può utilizzare il comando rapido **F12 (Automesh)** oppure dall'area di lavoro occorre andare nella sezione **2D** e cliccare sul tab **automesh**. In quest'area di lavoro si possono scegliere le caratteristiche della mesh nella sezione size and bias.

La prima scelta che occorre fare riguarda l'algoritmo di generazione della mesh stessa, è possibile scegliere tra **interactive** e **automatic**. La differenza tra i due algoritmi consiste nel fatto che il primo consente una modifica della mesh (e dei suoi parametri) appena generata prima della conferma della stessa, in modo da

ottimizzare, infittire o allargare la mesh nelle zone che ci interessano meno, mentre il secondo genera in maniera automatica una mesh secondo i parametri interni di HyperMesh.

La scelta ricade sull'algoritmo **interactive**.

Il secondo parametro da configurare è rappresentato dalla grandezza degli elementi che compongono la mesh, nella sezione **element size** è infatti possibile impostare la dimensione in [mm] degli elementi della mesh, in questo caso è stata scelta una dimensione di 5 mm.

Il terzo parametro fondamentale da impostare è la tipologia della mesh (**mesh type**) che si vuole andare a creare, le scelte possibili sono

- **quads** che costruisce una mesh principalmente costruita da quadrilateri
- **trias** che costruisce una mesh costruita solo da triangoli
- **mixed** che costruisce una mesh costruita da un equilibrio di elementi triangolari e poligoni a quattro lati
- **R-trias** che costruisce una mesh principalmente costruita da triangoli rettangoli
- **quads only** che costruisce una mesh principalmente costruita da quadrilateri, anche forzatamente rispetto all'equilibrio delle dimensioni degli elementi
- **advanced** che costruisce una mesh costruita da elementi mappati e liberi

Per il nostro modello CAD si è optato per la generazione di diverse tipologie di mesh (una trias, una quads e una mixed)

Un'altra scelta di primaria importanza è costituita dalla scelta tra elementi di primo o secondo ordine (first order/second order), nel nostro caso si è selezionato **first order**.

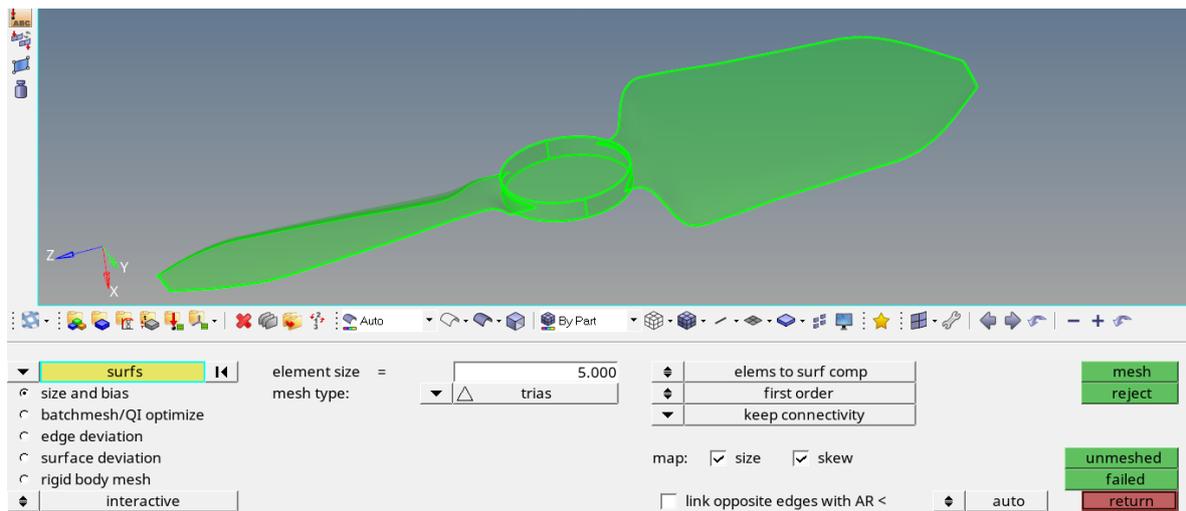


Figura 20: Il pannello automesh

Le altre configurazioni da effettuare riguardano una la gestione della mesh da parte del programma e l'altra il controllo della matrice connectivity. Le opzioni della gestione della mesh permettono due scelte: **elems to surf comp** che genera la mesh all'interno dello stesso componente della superficie selezionata; **elems to current comp** permette invece la creazione di un nuovo componente per tenere separata la mesh dalla superficie dalla quale essa viene generata. La scelta riguardante la matrice di connectivity permettono di gestire come i nodi generati della mesh possano collegarsi rispetto alle mesh vicine, la scelta ricade tra:

- **keep connectivity** ovvero collegare i nodi e mantenere la matrice della mesh con cui si effettua il collegamento
- **redo connectivity** collegare i nodi e rifare la matrice basandosi sulla nuova mesh generata e modificando la matrice della mesh a cui ci si collega
- **break connectivity** collegare i nodi ma non generare la matrice connectivity e gestire manualmente nelle fasi successive il collegamento della mesh

La scelta ricade su **keep connectivity** per evitare di gestire manualmente la matrice e generare errori nelle fasi successive durante la correzione della mesh.

Una volta scelti tutti i parametri di nostro interesse è possibile lanciare l'algoritmo di generazione della mesh attraverso il tab verde mesh. A causa della scelta dell'algoritmo interactive questo comando ci porterà ai sotto-pannelli per il controllo dei parametri della mesh. L'interesse si concentra in particolare sui pannelli **density** e **mesh style**.

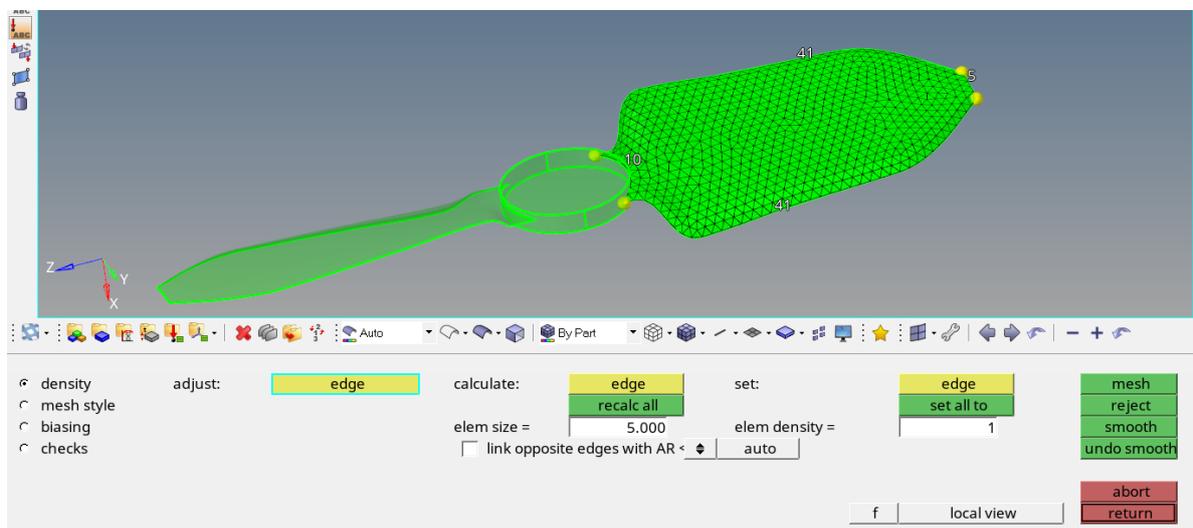


Figura 21: Il pannello density

A differenza dei pannelli precedenti il pannello density è gestibile dall'area grafica, è possibile infatti gestire quanti elementi generare per ogni lato/segmento della superficie riconosciuto dall'algoritmo. Nell'area grafica è possibile cliccare sul segmento della mesh d'interesse e aumentare (click sinistro) o diminuire (click destro) di un'unità il numero di elementi della mesh fino al raggiungimento della densità desiderata. In alternativa è possibile ricalibrare la mesh con un numero fisso di elementi per ogni lato/segmento della

superficie, a discapito dell'uniformità del reticolo generato, impostando nell'area di lavoro un valore in **elem density**, questo andrà a sostituire il numero di elementi del segmento o dei segmenti selezionati con il tab giallo edge. Se invece si vuole una mesh con numero di elementi uguale per ogni segmento della superficie occorre selezionare i lati con il tab giallo edge e successivamente cliccare sul tab verde set all to, che permetterà di impostare il numero di elementi indicato in elem density.

Il pannello mesh style invece si concentra sulla modifica di una o più sezioni della mesh che va ad agire su sezioni di superficie separate in precedenza. È possibile quindi selezionare una superficie precedentemente meshata in elementi tria e impostarla su elementi quad e viceversa, variando tra tutte le opzioni disponibili descritte nella sezione mesh type. In questo caso occorre selezionare la superficie con il tab giallo set surf e dopo aver selezionato la tipologia di elementi nel menù a tendina in basso cliccare sul tab verde set all, ancora una volta per confermare le modifiche in maniera permanente e applicarle alla mesh sarà necessario cliccare sul tab verde mesh.

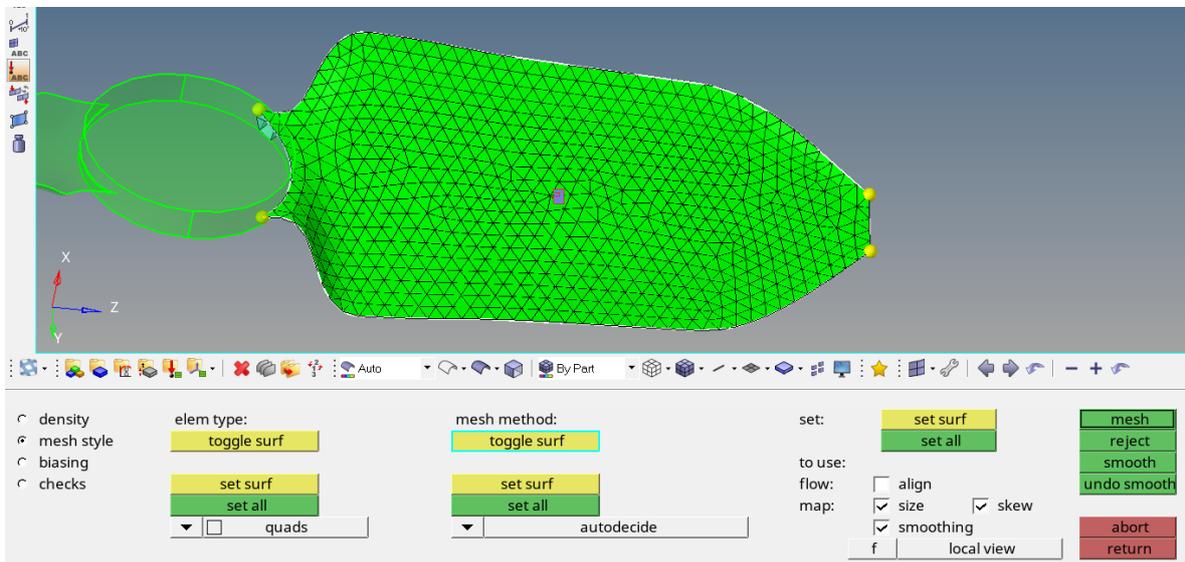


Figura 22: Il pannello mesh style

3.4.2 Tetramesh

La creazione della Tetramesh non risulta dissimile da quella della mesh 2D, anzi per molti step ricalca in maniera identica il percorso effettuato nella sezione precedente.

Per generare una Tetramesh infatti sarà necessario per prima cosa creare su ogni superficie del modello interessato delle mesh 2D e successivamente attraverso queste passare alla Tetramesh. I passaggi sono i medesimi indicati nella sezione precedente e si fa particolare attenzione ad un aspetto, cercare di far combaciare numericamente il numero di nodi nella zona di collegamento tra quella che sarà una Tetramesh e la già esistente mesh 2D. Questo perchè in caso di discordanza numerica e soprattutto di mancata correlazione tra matrici di connectivity, il programma riconoscerebbe la mesh come aperta e non procederebbe alla fase del processing generando la schermata di errore.

Una volta quindi generate le mesh 2D del modello interessato è possibile quindi lanciare il comando di creazione da **Mesh > Create > Tetramesh** che aprirà nell'area di lavoro il pannello Tetra Mesh. Da questo sotto la sezione Fixed trias/quads to tetra mesh sarà possibile selezionare gli elementi delle mesh 2D da trasformare in elementi Tetra, una volta selezionato elems (nella scelta tra elems e comps) sarà possibile cliccando sul tab giallo selezionare il comando by face e selezionare automaticamente le mesh interessate per superficie anzichè dover selezionare i singoli elementi manualmente.

Uno dei due parametri da configurare in questa fase è la modalità di creazione degli elementi Tetra, la scelta ricade tra:

- **Simple Pyramid** che genera delle piramidi a partire dagli elementi esistenti e successivamente modifica la tetramesh a seconda dei segmenti laterali delle piramidi generate, a causa della sua semplicità questa opzione produce una tetramesh di tipo frastagliato.
- **Smooth Pyramid**, crea degli elementi piramidali a partire da dei prismi generati automaticamente a partire dagli elementi esistenti
- **Split Quads into Trias**, che genera degli elementi tetra utilizzando delle piramidi con una faccia caratterizzata da un elemento quad esistente

Nel caso di una mesh trias la scelta risulta piuttosto irrilevante con una leggera differenza tra il comando Simple e il comando Smooth Pyramid, mentre la differenza si fa più marcata nelle mesh quads e mixed, dove è stato selezionato il comando **Split Quads into Trias**, che sicuramente darà luogo a un numero maggiore di elementi ma ciò si traduce in una maggiore accuratezza, risultando il bordo tra profili alari e albero una zona di particolare interesse.

Il secondo parametro da impostare in questa sezione riguarda la gestione del componente della tetramesh, anche questa volta sarà possibile scegliere se creare un nuovo componente oppure generare la tetramesh all'interno di un componente pre-esistente. Le possibilità di scelta sono:

- **mesh to current component**, che permette di generare la mesh nel componente selezionato o corrente (quello su cui si sta agendo)

- **create per-volume component**, che genera un nuovo componente con il flag volume
- **mesh to shell components**, che permette di trasferire la tetramesh nel componente dove sono presenti gli elementi 2D da cui è stata generata la tetramesh
- **create per-mesh component**, che genera un componente nuovo in cui trasferire la tetramesh

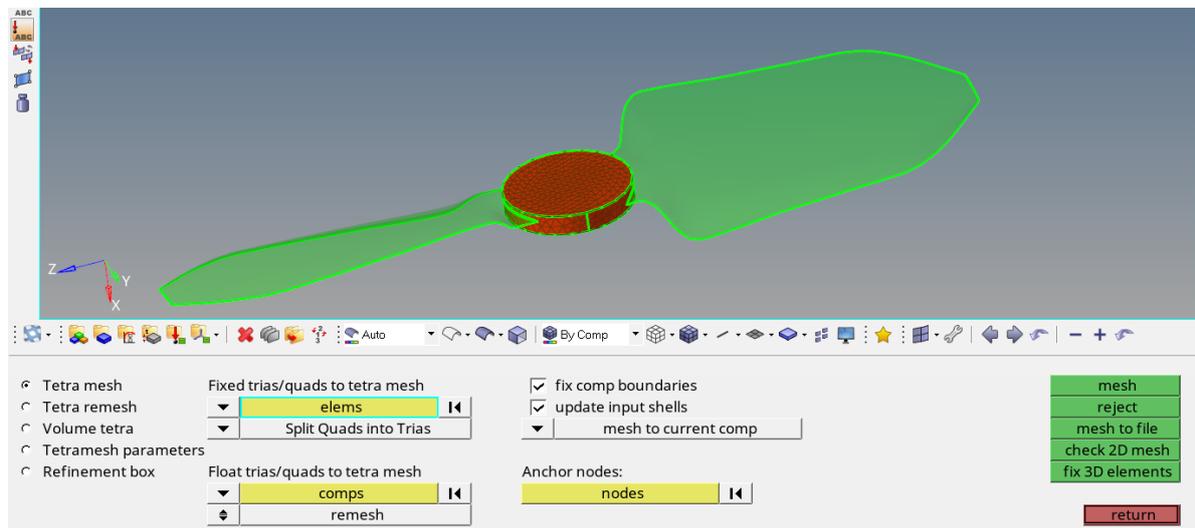


Figura 23: Il pannello tetramesh

Nel nostro caso l'esperienza con il programma ha portato ad una soluzione ibrida, ovvero, anziché scegliere l'ultima opzione, si è deciso di generare in precedenza un nuovo componente vuoto dal nome Tetra e dopo averlo fatto diventare il componente corrente è stata selezionata l'opzione mesh to current component. La scelta è dettata dalla possibilità di errori e crash del programma durante lo spostamento di elementi tetra e da un minore costo a livello computazionale della prima soluzione.

Una volta impostati questi due parametri nell'area di lavoro, è possibile passare al sottopannello **Tetramesh parameters**. In quest'area i parametri principali da impostare sono tre, l'algoritmo e la tipologia di creazione tetramesh, e il pyramid transition ratio.

Per quanto riguarda l'algoritmo di creazione si può scegliere tra tre opzioni:

- **Optimize mesh Quality**, che genera una mesh di qualità superiore a discapito della velocità;
- **Optimize mesh Speed**, che genera una mesh nel modo più veloce possibile, sacrificando la qualità;
- **Tetra mesh normally**, che offre un compromesso tra velocità di creazione e qualità della mesh generata.

Nel nostro caso, trattandosi di un numero piuttosto contenuto di elementi e di una sola tetramesh, la scelta è ricaduta sull'opzione che dava priorità alla qualità della mesh.

Per quanto riguarda la tipologia di creazione della tetramesh le possibilità sono:

- **Standard**, raccomandata per un utilizzo generico ;
- **Aggressive**, genera un numero minore di elementi tetraedrici dell'opzione standard perché utilizza un growth rate maggiore (growth rate 1.35)
- **Gradual**, genera un numero maggiore di elementi perché ha un growth rate minore dell'opzione standard (growth rate 1.08)
- **Interpolate**, utile quando la dimensione degli elementi tetraedrici deve essere interpolata a partire dalla dimensione della mesh 2D della superficie di riferimento (growth rate 1.08)
- **User Controlled**, definita dall'utente
- **Octree based**, un algoritmo di generazione mesh che dà priorità alla velocità
- **Delaunay**, basato sull'approccio delaunay, metodo raccomandato per dare priorità alle prestazioni.

Avendo generato la tetramesh a partire da mesh 2D sulla superficie del modello la scelta per la tipologia di creazione della mesh tetra è stata l'algoritmo **Interpolate**, ottimizzato per questo tipo di situazione.

Gli ultimi due parametri da impostare in questo sotto-pannello sono il **Pyramid transition ratio** e il **tetra collapse**, il primo indica il valore dell'altezza relativa degli elementi piramidali utilizzati per la transizione dagli elementi della superficie di bordo (nel nostro caso la mesh 2D) rispetto alla posizione degli elementi tetraedrici del centro. Il valore del tetra collapse indica quanto gli elementi piramidali generati si discostano da un elemento piramidale di altezza regolare, ovvero con i nodi perfettamente equidistanziati.

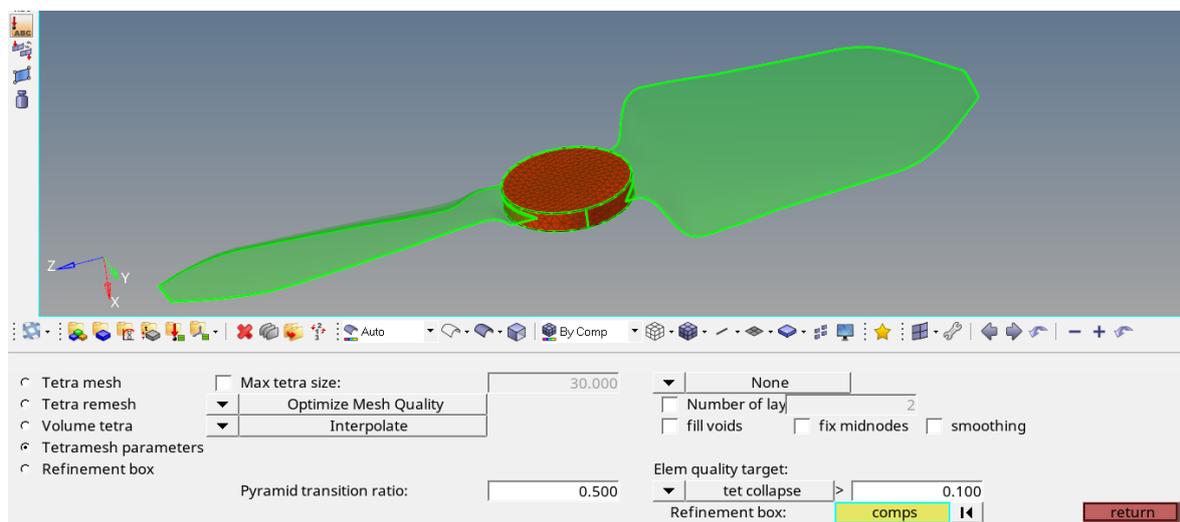


Figura 24: Il pannello Tetramesh parameters

Per questi parametri sono stati scelti rispettivamente 0.5 e 0.1, il primo per generare degli elementi piramidali senza nessun gradiente di altezza verso una direzione specifica, in

modo da garantire l'omogeneità della tetramesh e il secondo dettato dai valori solitamente richiesti dalle aziende che richiedono tale tipologia di analisi con tetramesh.

Una volta terminato di impostare questi parametri il passaggio successivo è quello di tornare nel pannello Tetramesh e lanciare l'algoritmo di generazione con il tab verde mesh.

4 Correzione & Ottimizzazione della Mesh

È molto comune una volta generata la mesh 2D e la tetramesh che le sezioni di collegamento contengano delle discontinuità o che ci siano dei nodi liberi a causa di imperfezioni durante la generazione o per discrepanza numerica dei nodi stessi. Un altro motivo per cui le due tipologie di mesh possano non risultare collegate è di tipo puramente geometrico, le mesh infatti vengono generate rispetto a delle superfici di riferimento che sono comuni ma possono contenere dei punti di riferimento diversi a seconda di densità e tipologia di elementi della mesh stessa.

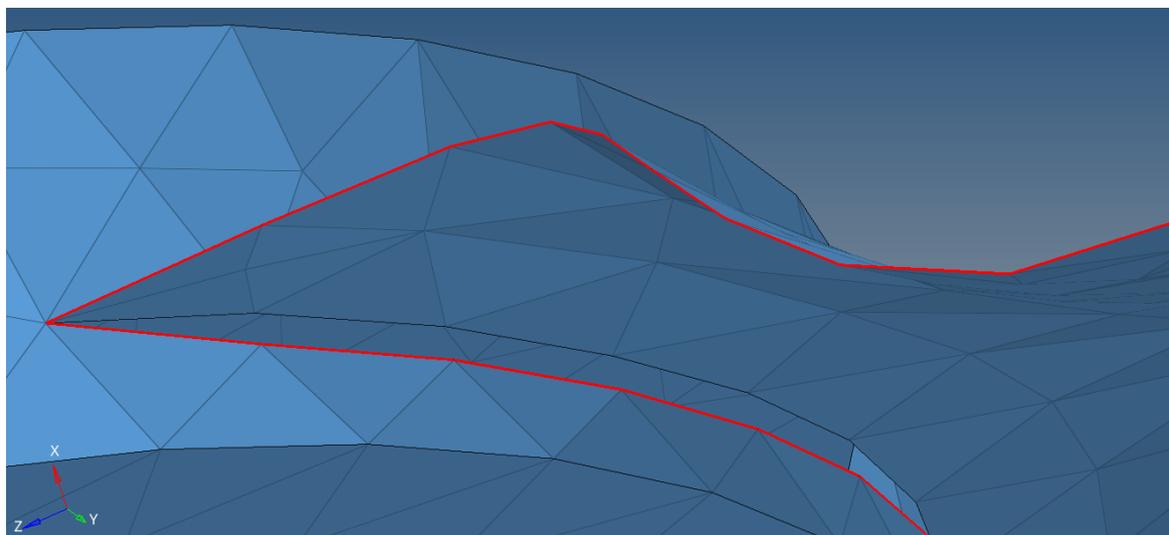


Figura 25: Una mesh sconnessa

In questo caso sarà necessario collegare manualmente i nodi della mesh in modo da ottenere una mesh continua e chiusa, occorre utilizzare il pannello **Replace** nell'area di lavoro, accessibile sia tramite comando rapido F3, sia attraverso **Mesh > Edit > Replace node**.

Il procedimento è piuttosto intuitivo, con il tab giallo superiore si sceglie il nodo che si desidera modificare e con quello inferiore il nodo rispetto al quale far avvenire la modifica, che sia essa un collegamento diretto o uno spostamento di entrambi i nodi nella direzione comune.

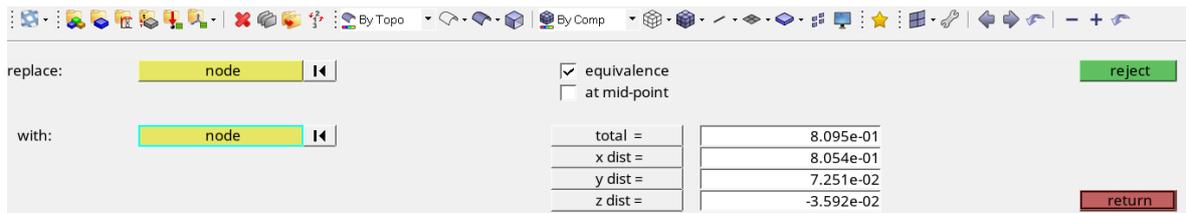


Figura 26: Il pannello Replace

Di particolare importanza in questo pannello sono le due flag **equivalence** e **at mid-point**, che indicano rispettivamente la volontà di mantenere/collegare la matrice di connectivity quando si collegano i nodi delle mesh e la possibilità di spostare in una posizione media il nodo finale rispetto a quella iniziale dei due nodi collegati.

La scelta opportuna nel nostro caso rimane quella di spuntare il flag equivalence e di lasciare vuota la casella at mid point, perchè sono stati scelti come nodi di riferimento per il collegamento quelli della mesh 2D dei profili alari e modificare la posizione di quei nodi significherebbe alterare la posizione del collegamento rispetto all'albero. È stato quindi ritenuto opportuno modificare leggermente la posizione dei nodi della tetramesh del modello dell'albero e mantenere inalterata la posizione dei nodi dei profili alari.

Una volta terminata questa operazione è di vitale importanza verificare che all'interno della mesh non siano presenti nodi liberi. Per effettuare questa verifica è necessario utilizzare il pannello **Free Edges** accessibile tramite il comando rapido **Shift + F3**. È possibile selezionare tutti gli elementi presenti all'interno della mesh utilizzando il tab giallo in basso a sinistra elems > all. Esso renderà gli elementi della mesh di colore bianco ad indicare il fatto che sono stati selezionati, per verificare eventuali bordi liberi o nodi non connessi della mesh occorre cliccare sul tab verde free edges, il quale individuerà eventuali bordi o nodi liberi indicandoli con una linea rossa.

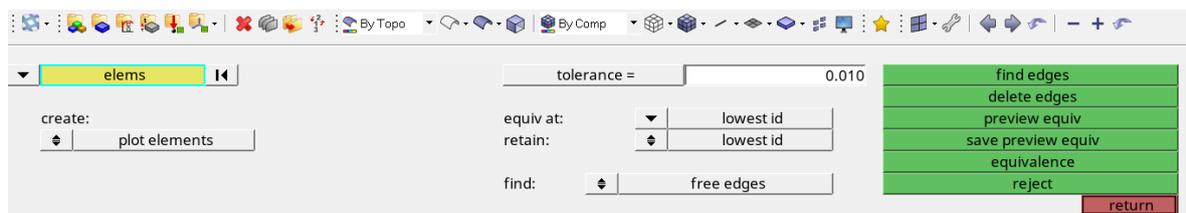


Figura 27: Il pannello Free Edges

Se sono presenti bordi liberi, fatta eccezione per gli estremi della mesh stessa essi devono essere corretti attraverso il pannello Replace, in caso contrario la mesh sarà verificata come chiusa e non ci saranno problemi nell'effettuare le analisi.

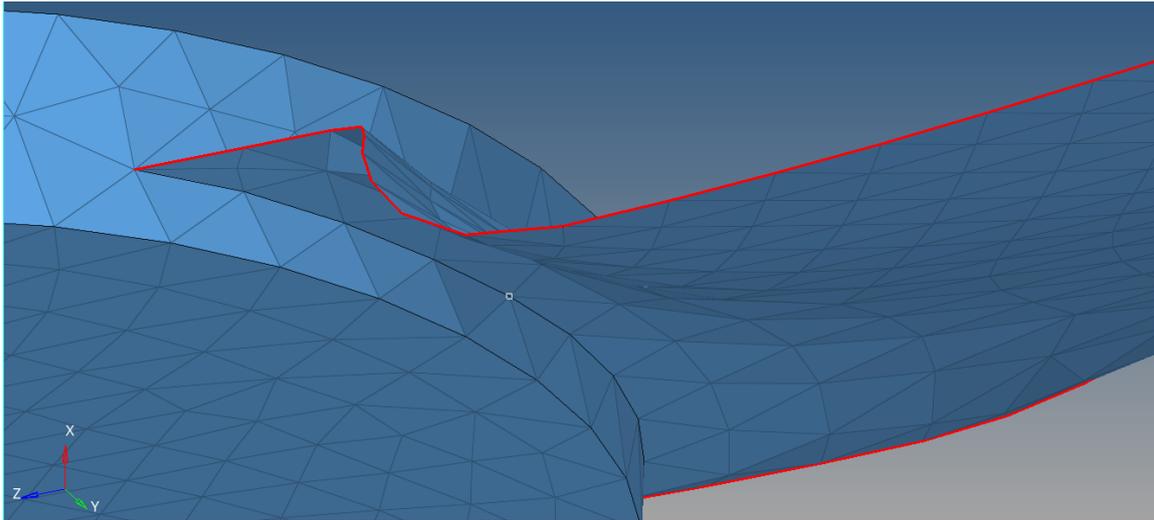


Figura 28: La mesh correttamente chiusa

4.1 Quality index, smooth panel, elements cleanup

Lo step successivo alla verifica dell'assenza di nodi liberi nella mesh è l'ottimizzazione degli elementi che la compongono. Gli strumenti di Hypermesh che ci consentono tale operazione sono il quality index, lo smooth panel e la sezione elements cleanup. Prima di entrare nel dettaglio sull'utilizzo di questi strumenti è necessario valutare i parametri che questi utilizzano per calcolare la qualità della mesh.

4.1.1 Warpage, Skew, jacobian per la mesh 2D

Per quanto riguarda le mesh di tipo shell ovvero quelle 2D i principali parametri da considerare sono quattro:

- **Warpage**, esso rappresenta quanto un elemento, o nel caso di elementi solidi, la faccia di un elemento, devia dall'essere perfettamente piana. Questo valore non è calcolato per gli elementi triangolari, in quanto 3 punti possono definire un solo piano ma è applicabile agli elementi di tipo quads. L'elemento è diviso virtualmente in due elementi triangolari lungo la sua diagonale principale e viene calcolato l'angolo che intercorre tra le normali delle facce degli elementi tria.

Solitamente è accettabile un valore di Warpage fino a 5 gradi.

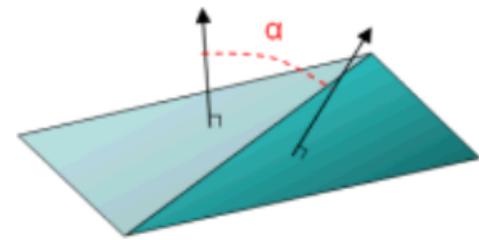


Figura 29: Warpage

- **Skew**, il valore di Skew di un elemento triangolare è calcolato considerando l'angolo minore che si trova incrociando il vettore che passa tra un nodo e il punto medio del suo lato opposto e il vettore che collega i due punti medi di due lati adiacenti, per ogni nodo dell'elemento. Il valore minimo dell'angolo trovato viene successivamente sottratto da 90 gradi e riportato come valore di Skew.

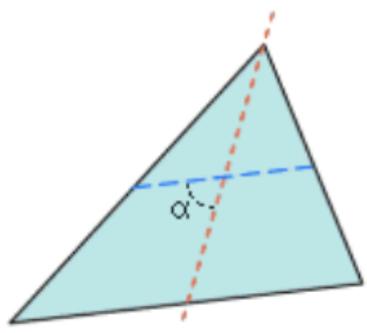


Figura 30: Skew di un elemento tria

Per un elemento quad, HyperMesh traccia una linea virtuale che connette i due punti medi dei lati dell'elemento per ogni lato di esso, successivamente crea una linea perpendicolare ad una di queste precedentemente tracciate e calcola l'angolo tra le linee iniziali e quella perpendicolare, è presente un angolo a meno che non si tratti di un elemento perfettamente quadrato o rettangolare.

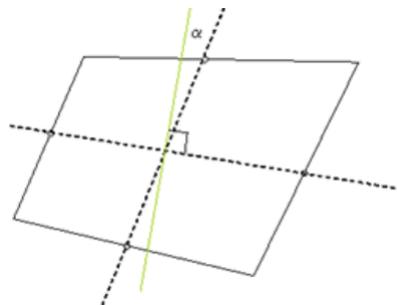


Figura 31: Skew di un elemento quad

- **Jacobian**, esso rappresenta la deviazione di un elemento dalla sua forma "perfetta" o ideale, ad esempio la deviazione di un triangolo dall'essere equilatero. Il valore Jacobian ha un range che varia tra 0.0 e 1.0, dove 1.0 rappresenta un elemento di forma perfetta. Il fattore determinante del valore di Jacobian è calcolato in relazione a quanto effettivamente l'elemento possa essere modificato all'interno dello spazio parametrico in quanto esso deve necessariamente ricadere all'interno dello spazio individuato dalle coordinate globali dei nodi.

HyperMesh valuta il determinante della matrice Jacobiana per ciascuno dei punti di integrazione dell'elemento, chiamati punti di Gauss o nei nodi di bordo dell'elemento e considera il rapporto tra il più piccolo e il più grande valore trovato. Nel caso

di valutazione Jacobiana nei punti di Gauss, valori intorno a 0.7 o superiori sono generalmente accettati.

- **Lenght**, il valore di lunghezza minima dell'elemento, esso viene calcolato in due modi:

il lato più corto di un elemento, nel caso di elementi 2D o elementi 3D che non siano tetraedrici.

la distanza più corta tra un nodo e il suo lato opposto (o una faccia nel caso di elementi tetra) generalmente chiamata altezza minima normalizzata.

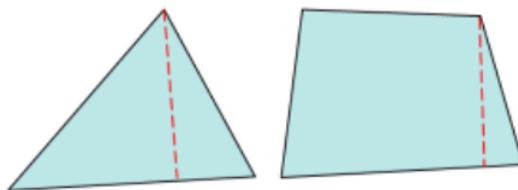


Figura 32: Lenght (valore min)

4.1.2 Volume skew, Tetra collapse e minimum size per la Tetra Mesh

Per quanto riguarda le mesh 3D i parametri da considerare sono quattro:

- **Minimum Length** o **Size**, la lunghezza minima o dimensione minima;

HyperMesh utilizza due metodi per calcolare la dimensione minima di un elemento 3D: il lato più corto dell'elemento (nel quale viene utilizzata la lunghezza del più piccolo dei lati che compone l'elemento stesso) e l'altezza minima normalizzata (metodo più accurato ma più complesso).

Nel metodo dell'altezza minima normalizzata, HyperMesh calcola la distanza perpendicolare dal piano formato dalle facce opposte per ogni nodo dell'elemento. La dimensione più piccola risultante da questo calcolo è la minore di tutte le distanze misurate e viene interpretata come altezza minima normalizzata.

- **Tetra Collapse**, quanto un elemento risulta schiacciato su se stesso, il valore del tetra collapse è calcolato a partire dall'altezza dell'elemento tetra, misurata da ognuno dei quattro nodi delle facce opposte e successivamente divisa per la radice quadrata dell'area della faccia considerata. Il valore minimo dei quattro risultati ottenuti (uno per nodo) viene in seguito normalizzato dividendolo per 1.24. Se l'elemento tetra collassa su se stesso il valore del tetra collapse si avvicina a 0.0 in contrasto con il valore 1.0 che rappresenta un elemento tetra perfetto. Agli elementi non tetraedrici viene assegnato di default un valore 1 in modo tale che HyperMesh non li riconosca come elementi tetra sbagliati o da ottimizzare.

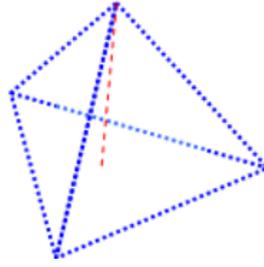


Figura 33: Tetra Collapse

- **Volume Aspect Ratio**, il rapporto d'aspetto di un elemento, HyperMesh giudica la qualità di un elemento tetra rapportando la lunghezza massima del lato di un elemento con la sua altezza minima (misurata da un nodo alla faccia opposta). Per altri elementi 3D come gli elementi hexa, le valutazioni vengono effettuate prendendo in considerazione solo il rapporto tra il lato più lungo di un elemento e la dimensione minore di quest'ultimo.
- **Volume Skew**, Distorsione volumetrica.

Questo controllo della qualità dell'elemento è riservata solo agli elementi tetra; ai restanti elementi è assegnato il valore zero. Il Volume Skew è definito come un fattore di forma monodimensionale, quindi un valore di 0 rappresenta l'elemento perfetto e un Volume Skew pari a 1 rappresenta il peggior valore possibile, ovvero la massima distorsione del volume dell'elemento.

Il fattore di forma per un elemento tetraedrico è determinato dal rapporto del volume dell'elemento preso in analisi e il volume di un tetraedro ideale (equilatero) identificato dallo stesso circumraggio. Nel caso di un elemento tetraedrico il circumraggio è il raggio di una sfera passante per i quattro vertici del tetraedro.

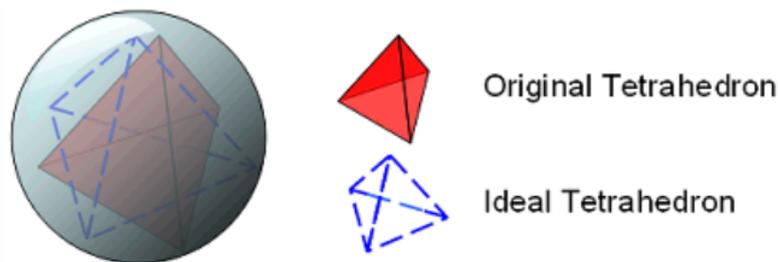


Figura 34: Volume Skew

Lo strumento che permette di effettuare un'analisi approfondita della qualità della mesh andando a valutare i valori di Warpage, Skew e Jacobian per gli elementi 2D e Volume Skew, Tetra collapse e minimum size per quelli 3D entro un certo range ammissibile è il **Quality Index**. Questo strumento è accessibile tramite **Mesh > Check > Elements > Quality index** o attraverso l'area di lavoro nella sezione **2D > qualityindex**.

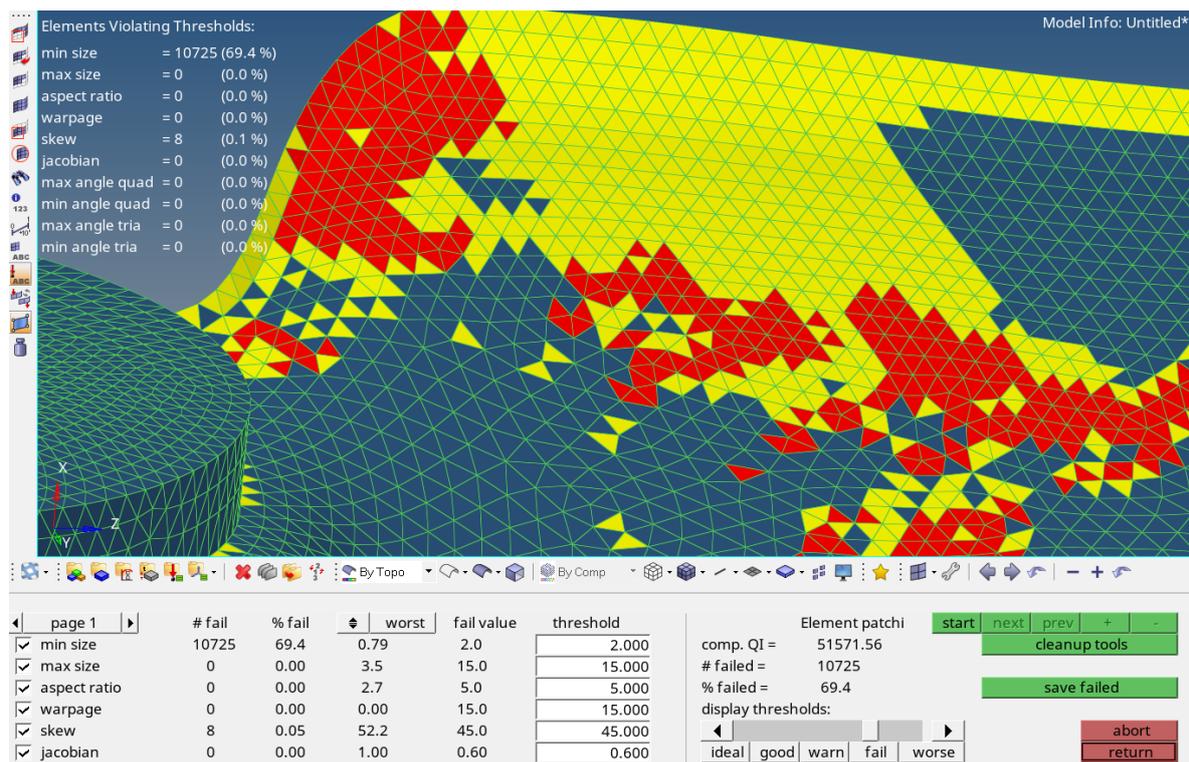


Figura 35: Il Quality Index

Una volta fatto l'accesso al Quality index gli elementi della mesh assumeranno diversi colori a seconda della qualità assegnata, rosso per indicare gli elementi da sostituire o in cui devono essere effettuate grosse modifiche, giallo per gli elementi da correggere leggermente e verde per gli elementi che sono già ottimizzati. Nella parte alta dell'Area grafica è presente una legenda con il numero degli elementi che non rispettano i parametri su cui si va ad effettuare il controllo qualità e la percentuale di questi rispetto al numero totale degli elementi della mesh.

In basso a sinistra è possibile selezionare quali dei parametri del Quality index devono essere utilizzati durante l'analisi della mesh ed è possibile inoltre specificare sotto la sezione treeshold il range entro questi valori sono accettabili. Nel pannello di lavoro è presente uno slider che permette di scegliere l'accuratezza dell'analisi di qualità effettuata. Esso presenta cinque opzioni:

- **Ideal**, il valore migliore che un elemento possa raggiungere. Per esempio un elemento ideale dovrebbe avere un aspect ratio di 1.0, warpage di 0.0, jacobian di 1.0 e rispettare tutti i requisiti imposti perfettamente.
- **Good**, questo valore è leggermente peggiore di Ideal ma è comunque caratterizzato da requisiti molto stringenti. Tutti gli elementi che rientrano in questa categoria sono generalmente considerati perfetti per un analisi di tipo strutturale.
- **Warn**, è il livello intermedio tra Good e Fail, utilizzato per indicare gli elementi che non hanno fallito i criteri dei parametri di qualità ma sono molto vicini al treeshold.

- **Fail**, determina gli elementi che sono considerati non accettabili per l'analisi. È raccomandato modificare o correggere gli elementi prima di lanciare l'analisi stessa.
- **Worst**, è indicato per gli elementi che hanno un grosso margine di errore rispetto ai parametri di qualità della mesh, sono solitamente indicati in rosso.

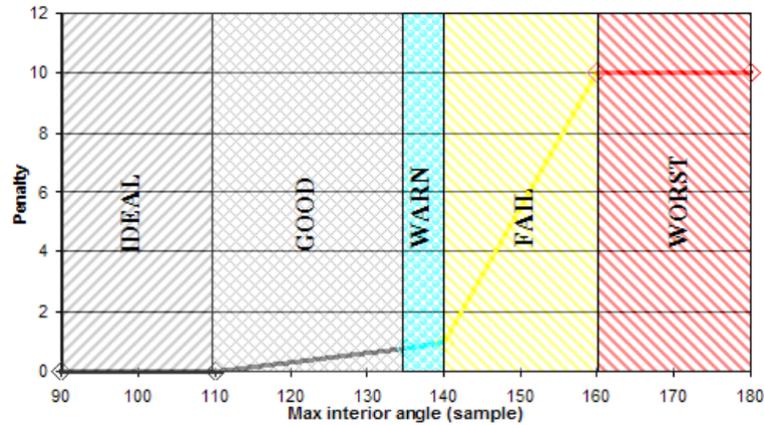


Figura 36: I criteri del Quality Index

Considerando i criteri di qualità interni di Hypermesh, indicati nel grafico, l'operazione corretta da eseguire è impostare lo slider su Fail e correggere gli elementi in modo tale che ogni elemento rientri almeno nella sezione Warn, ovvero che nessun elemento dopo aver lanciato il quality index venga evidenziato in giallo o in rosso.

Esistono diversi metodi per modificare la qualità degli elementi della mesh, è possibile andare ad agire manualmente sugli elementi che non hanno passato il controllo qualità oppure utilizzando gli strumenti automatici presenti. Il metodo manuale prevede l'utilizzo del comando **save failed** e del pannello **smooth panel**. Il primo serve a mantenere in memoria gli elementi che non hanno rispettato il threshold del quality index per andare ad agire su di essi in maniera isolata rispetto al resto della mesh. Una volta utilizzato è possibile infatti andare nella sezione **2D > smooth** e accedere al pannello **smooth panel**, selezionare gli elementi presenti in memoria attraverso il comando **elems > retrieve** e agire su quest'ultimi.

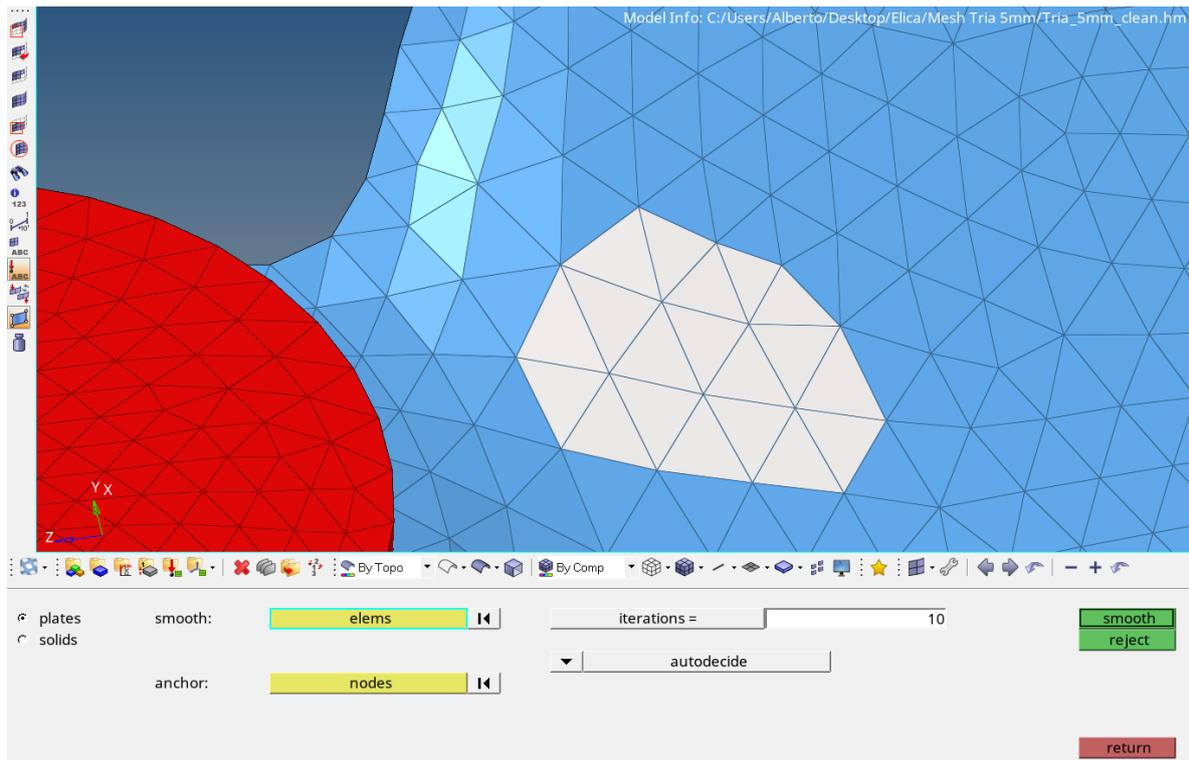


Figura 37: Il pannello smooth

Il pannello smooth presenta tre opzioni principali, gli elementi da modificare, il numero di iterazioni dell'operazione da effettuare sugli elementi e la tipologia di modifica da effettuare. Per quanto riguarda quest'ultima scelta sono presenti cinque possibilità:

- **size corrected**, questa opzione va ad ottimizzare gli elementi facendo particolare attenzione ai requisiti di dimensione dell'elemento
- **shape corrected**, in questo caso l'attenzione si sposta sui requisiti di aspect ratio e fattore di forma dell'elemento
- **angle corrected**, questa opzione dedica particolare importanza agli angoli interni dell'elemento (è opportuna nel caso di elementi quad o nel caso di elementi 3D)
- **QI optimization**, è l'opzione che va a correggere al meglio tutti i parametri selezionati all'interno del Quality index, in questo caso però è opportuno iterare l'operazione di controllo in quanto agisce anche sugli elementi prossimi a quelli selezionati.
- **autodecide**, è la scelta che racchiude tutte le opzioni precedenti e lascia decidere all'algoritmo di ottimizzazione interna di Hypermesh come andare a modificare il singolo elemento per soddisfare al meglio i requisiti di qualità.

Le opzioni migliori nel nostro caso risultano essere QI optimization e autodecide, in quanto l'obiettivo finale è quello di far rientrare nel threshold imposto dal Quality index e far rispettare i parametri imposti da questo.

Il metodo automatico di correzione degli elementi prevede due possibilità, una modalità mista e una completamente automatizzata. La modalità mista è rappresentata dall'utilizzo dei cleanup tools presenti all'interno del quality index.

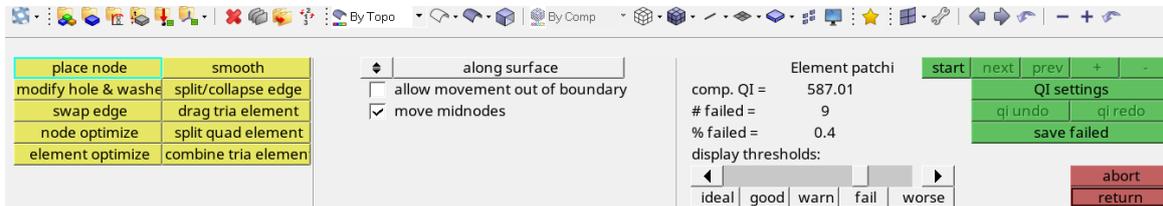


Figura 38: I cleanup tools

Una volta fatto l'accesso al pannello dedicato è possibile avere accesso ad una serie di strumenti dedicati alla correzione automatica e all'ottimizzazione degli elementi indicati nei pannelli in giallo. Tra questi tre strumenti sono particolarmente utili:

- **node optimize**, permette di agire sul singolo nodo dell'elemento interessato e lo modifica opportunamente cercando di correggere eventuali imperfezioni
- **element optimize**, permette di agire sull'intero elemento andandolo ad ottimizzare in maniera diretta, è uno strumento molto più aggressivo dell'ottimizzazione del nodo e spesso può causare artefatti nella mesh
- **split quad into trias**, divide un elemento quad che non rispetta i parametri di qualità in due elementi tria già ottimizzati.

Si parla di modalità mista perchè nonostante sia il programma ad agire e ottimizzare singolarmente gli elementi è comunque l'utente finale che sceglie quali strumenti utilizzare e come utilizzarli e soprattutto su quali elementi andare ad agire.

La modalità di ottimizzazione automatica invece prevede l'utilizzo dello strumento **element cleanup**. Esso va ad agire sulla mesh nella sua interezza e risulta piuttosto intuitivo da utilizzare, una volta accesso al pannello dedicato dall'area di lavoro da 2D > elem cleanup la mesh viene divisa a livello grafico in elementi di colore grigio e oro, che rappresentano gli elementi su cui andrà ad agire lo strumento. È possibile modificare i criteri con cui questo strumento agisce sulla mesh attraverso il pannello **edit criteria** ma di default sono impostati per soddisfare i requisiti del Quality index. Per procedere all'ottimizzazione automatica sarà necessario cliccare sul pannello verde cleanup e attendere la fine dell'operazione.

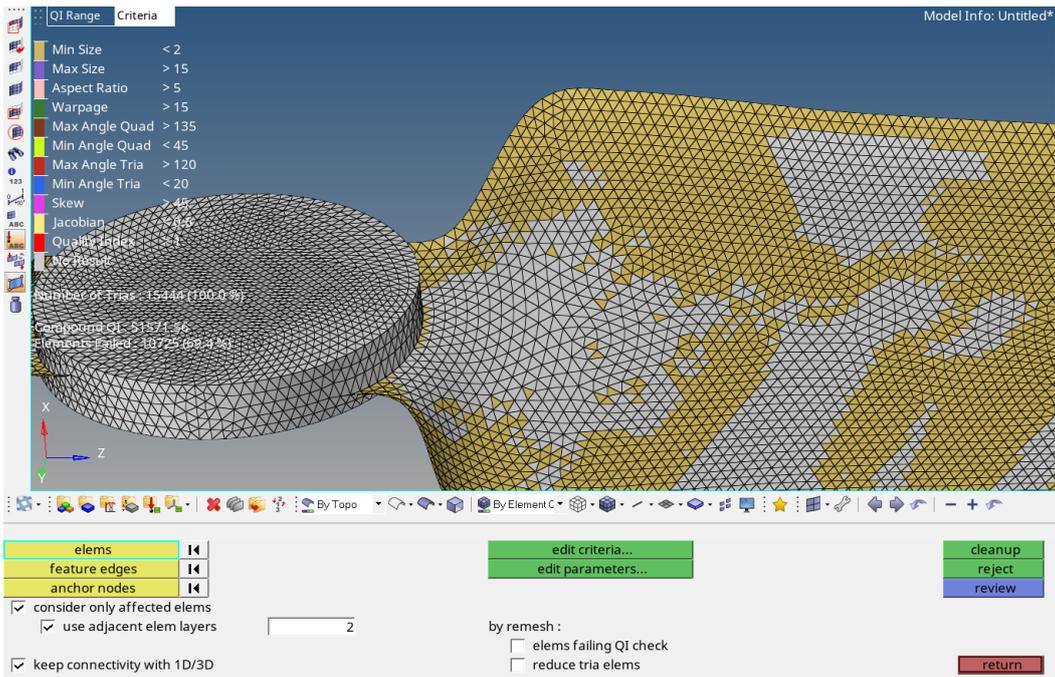


Figura 39: Il pannello element cleanup

Nella procedura di ottimizzazione della mesh non c'è una scelta giusta o sbagliata, è preferibile utilizzare l'ottimizzazione manuale ma occorre tenere in considerazione il dispendio di tempo ad esso collegato, oppure si può optare per il processo automatico, sicuramente più veloce, ma meno accurato e con la possibilità di non ottenere il risultato sperato. In entrambi i casi una volta effettuate le modifiche è opportuno rilanciare lo strumento di Quality index e verificare la qualità degli elementi della mesh per assicurarsi che tutti i parametri siano stati rispettati.

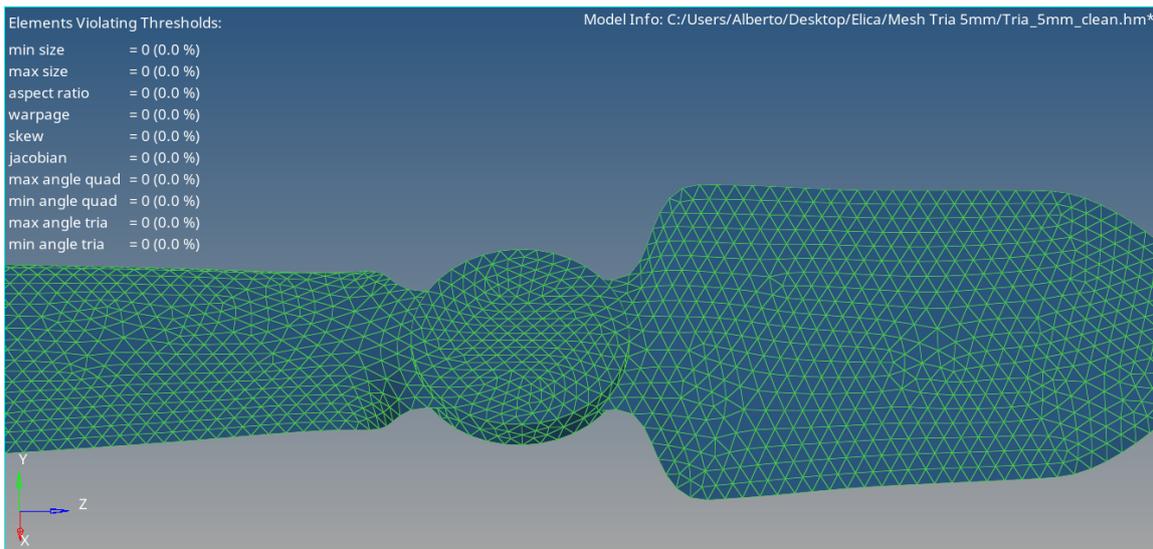


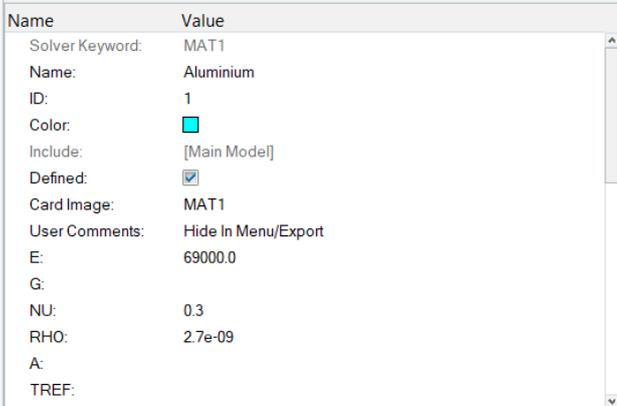
Figura 40: La mesh ottimizzata

5 Materiali, proprietà & Boundary conditions

Terminata la correzione e l'ottimizzazione della mesh, lo step successivo è rappresentato dall'assegnazione delle proprietà del materiale del modello che si vuole analizzare e dei vincoli ad esso applicati.

5.1 Materiali e Proprietà PSHELL 2D

Per quanto riguarda i materiali è necessario creare il collector nella Tab area con il comando tasto destro **Create > Materials** e assegnare le caratteristiche del materiale scelto nella finestra card che viene visualizzata nella parte inferiore della Tab area. Per il nostro modello abbiamo scelto come materiale l'alluminio e come parametri di input sono stati inseriti il modulo elastico $E = 69000$ MPa, modulo di Poisson $\nu = 0.3$ e densità $\rho = 2.70 \times 10^{-9} \text{ kg/mm}^3$



Name	Value
Solver Keyword:	MAT1
Name:	Aluminium
ID:	1
Color:	■
Include:	[Main Model]
Defined:	<input checked="" type="checkbox"/>
Card Image:	MAT1
User Comments:	Hide In Menu/Export
E:	69000.0
G:	
NU:	0.3
RHO:	2.7e-09
A:	
TREF:	

Figura 41: La scheda materiale

Dopo aver creato la scheda materiale è necessario assegnare tali proprietà alle mesh precedentemente generate. Cliccando con il tasto destro nella Tab area è possibile selezionare il comando **Create > Property** e occorre creare una proprietà per ogni tipologia di mesh creata. Hypermesh infatti fa distinzione tra le proprietà assegnate alle mesh 2D, poichè è possibile includere parametri dimensionali, come ad esempio lo spessore di una superficie, e le proprietà di una tetramesh, alle quali non è possibile aggiungere parametri di forma e dimensione, in quanto tutte le informazioni sono già contenute all'interno della mesh stessa.

Per la proprietà della mesh 2D sono 3 i parametri che sono stati inseriti:

- **Card Image**, identificativo della tipologia di mesh, per le mesh di tipo bidimensionale è necessario selezionare l'opzione PSHELL
- **Material**, nel quale è stato assegnato il collector del materiale precedentemente creato (Aluminium)
- **T**, che indica il valore dello spessore, nel nostro caso il valore applicato è 1.0

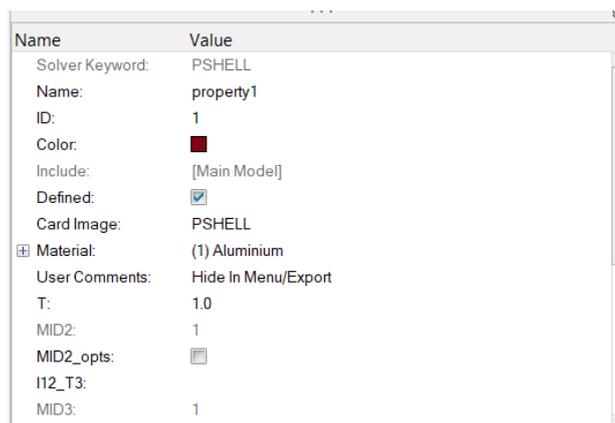


Figura 42: La scheda proprietà mesh 2D PSHELL

5.2 Spessore

Riguardo la proprietà dello spessore è preferibile dedicare una sezione specifica, OptiStruct infatti permette l'assegnazione dello spessore tre diverse modalità di assegnazione del valore Thickness della mesh 2D:

- **MID4**, il metodo più comune di assegnare lo spessore ad una superficie. Si utilizza il piano identificato dagli elementi che compongono la mesh 2d come superficie di riferimento di mezzeria e per ogni singolo elemento viene assegnato uno spessore pari alla metà del valore di Thickness in modo tale che venga creato un volume equidistante dagli elementi in entrambe le direzioni dello spessore. Gli elementi bi-dimensionali utilizzano il modello del guscio sottile o quello delle piastre. Il modello del guscio sottile può essere applicato a situazioni dove la deformazione a taglio trasversale a flessione può essere trascurata (occorre lasciare il valore MID3 invariato), mentre il modello delle piastre è richiesto nelle applicazioni in cui il taglio trasversale ha un effetto apprezzabile sul comportamento del modello. Quello utilizzato maggiormente è la teoria di Reissner-Mindlin, impostata di default, in OptiStruct per modellare il comportamento di strutture che permettono la flessione.

I casi possibili sono quattro:

Membrane Shell (Plane Stress) individuato dai valori invariati di MID2, MID3 e MID4, identifica la Teoria membranale pura dei gusci. Vengono considerati elementi puramente membranali per il calcolo dello stress nel piano - niente flessione, coupling, o rigidità a taglio trasversale.

Membrane Shell (Plane Strain), il valore MID2 = -1, identifica la Teoria membranale dei gusci. Vengono considerati elementi membranali per il calcolo delle deformazioni nel piano Nessuna flessione o rigidità a taglio trasversale.

Thin-Shell Formulation, identifica la teoria del guscio sottile, la deformazione trasversale a taglio è trascurata (agendo sulla rigidità a taglio trasversale), il valore MID3 deve rimanere invariato.

Thick-Shell Formulation, modello che utilizza la teoria delle piastre, la deformazione a taglio trasversale viene considerata, il valore MID3 è un dato di input.

- **ZOFFS**, il comando ZOFFS può utilizzare due differenti formati di input: un valore reale e uno di superficie.

Nel caso del valore reale, un numero positivo o negativo viene inserito ed esso determina la distanza dal piano di riferimento identificato dagli elementi shell 2D lungo l'asse z del sistema di coordinate degli elementi.

Nel caso di un valore di superficie la scelta ricade tra due opzioni TOP e BOTTOM:

Top, la superficie superiore degli elementi shell definiti da spessore e il piano definito dai nodi degli elementi sono coplanari. Questo metodo rende il valore reale di ZOFFS pari alla metà del valore di thickness degli elementi PSHELL. In pratica viene generato uno spessore a partire dalla superficie superiore, procedendo verso il basso, nel piano z.

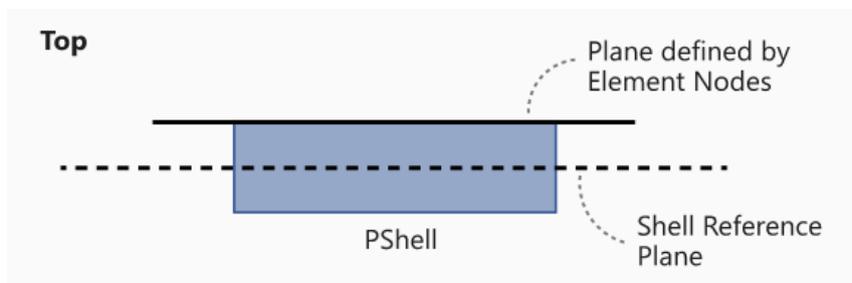


Figura 43: Top Option in ZOFFS

Bottom, la superficie inferiore degli elementi shell definiti da spessore e il piano definito dai nodi degli elementi sono coplanari. Anche in questo caso il metodo rende il valore di ZOFFS pari alla metà del valore di thickness degli elementi PSHELL. In pratica viene generato uno spessore a partire dalla superficie degli elementi, procedendo verso l'alto, nel piano z fino a raggiungere lo spessore desiderato.

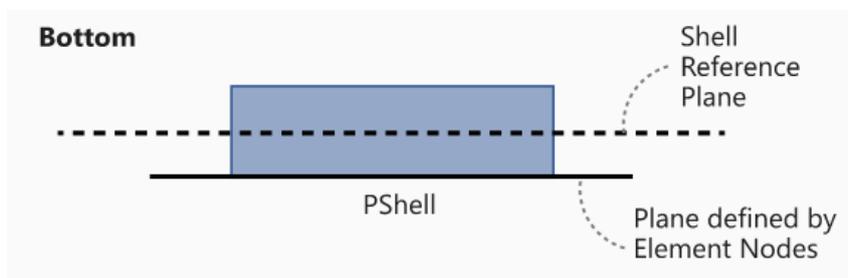


Figura 44: Bottom Option in ZOFFS

5.3 Materiali e Proprietà PSOLID 3D

Per quanto concerne le proprietà della Tetramesh i parametri inseriti sono invece

- **Card Image**, per le mesh di tipo tetra è necessario selezionare l'opzione PSOLID
- **Material**, nel quale è stato assegnato il collector del materiale precedentemente creato (Aluminium)

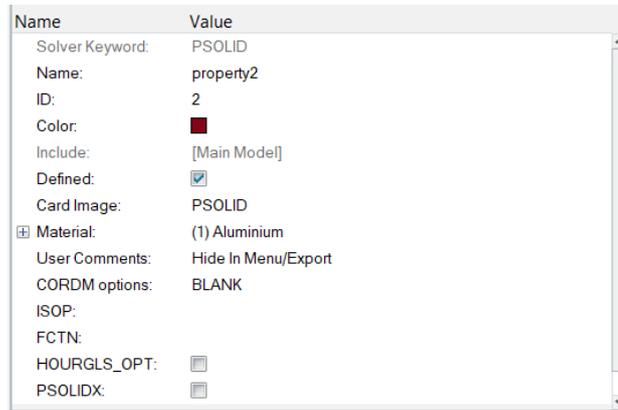


Figura 45: La scheda proprietà Tetramesh PSOLID

In entrambi i casi è stata fatta attenzione nell'assegnare un nome e un ID diverso alle proprietà per non generare conflitti nel richiamo di quest'ultime nel solutore.

5.4 Boundary Condition

La creazione dei vincoli è dovuta al fatto che se il modello non venisse vincolato in nessun modo, l'applicazione di un qualsiasi tipo di carico comporterebbe spostamenti infiniti (e di conseguenza delle singolarità nella matrice di rigidità) e il software di calcolo restituirebbe un messaggio di errore. Si rende quindi necessaria la possibilità di vincolare uno o più nodi della mesh generata, ovvero privare di uno o più gradi di libertà tali nodi.

I vincoli nel software rientrano nella categoria BC, **Boundary Conditions**, non viene fatta alcuna distinzione tra carichi e vincoli in quanto entrambi vengono considerati condizioni al contorno. Durante l'assegnazione dei vincoli è necessario fare una distinzione tra elementi shell e elementi solid, i primi infatti possiedono tutti e sei i gradi di libertà (3 traslazioni e 3 rotazioni nello spazio), mentre per quanto riguarda i nodi degli elementi solid possono soltanto traslare rispetto agli assi x,y e z.

È possibile scegliere la tipologia di vincolo associata ai nodi della mesh, essi possono essere:

- **SPC (Single Point Constraint)**, vincoli riferiti al nodo stesso (un esempio è il caso in cui si impone uno spostamento su uno o più gradi di libertà);
- **MPC (Multiple Point Constraint)**, vincoli di tipo dipendente, nell'imposizione del vincolo su un nodo si fa riferimento ad un altro nodo (o ad altri nodi).

Per la creazione dei vincoli è necessario andare nel menù principale e selezionare il comando **BCs > Create > Constraint**, in questo modo si avrà accesso al sotto-pannello dedicato ai vincoli indicato in figura.

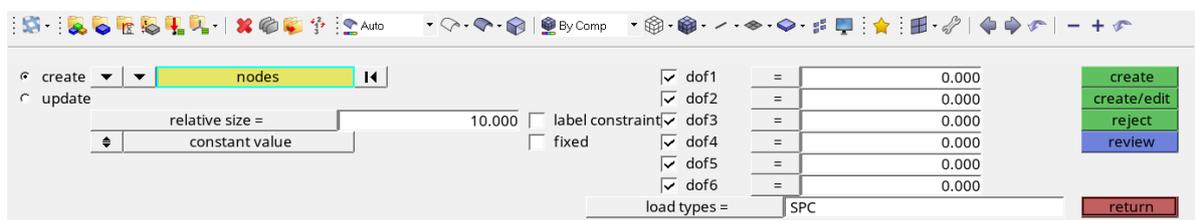


Figura 46: Il pannello Constraint

I parametri principali di questa sezione sono:

- la tipologia di vincolo, indicata in **load types**, nel nostro caso è stato scelto SPC
- la dimensione grafica del vincolo, in **relative size**, il valore di input scelto è stato 10
- la selezione dei gradi di libertà, indicata dalle 6 caselle (dof1, dof2, dof3, etc)
- la selezione dei nodi interessati dal vincolo, nel tab giallo **nodes** infatti è possibile selezionare il campo **by face** e assegnare l'intera superficie inferiore del modello a cui è stata assegnata la tetramesh.

Una volta inseriti i parametri necessari nel sotto-pannello basterà cliccare sul tab verde **create** e verranno assegnati ai nodi selezionati i vincoli scelti.

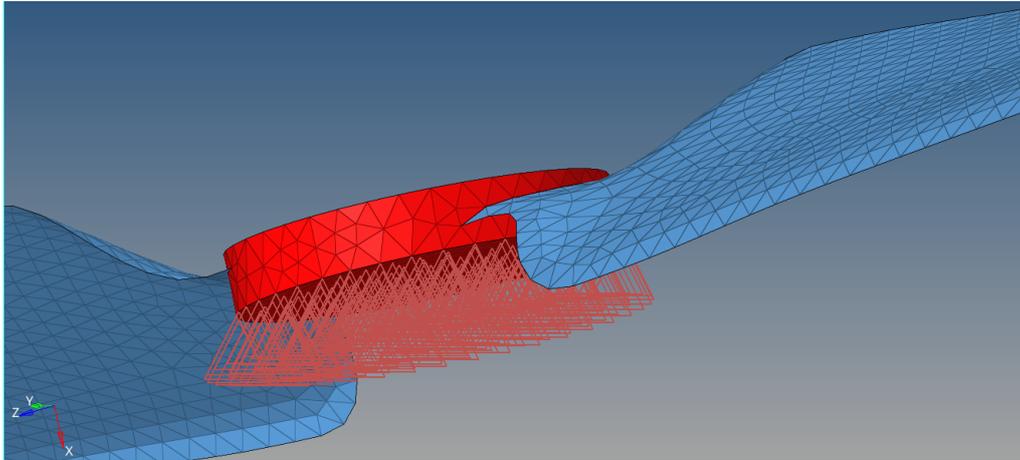


Figura 47: I vincoli applicati nella superficie inferiore dell'albero

6 Processing

Una volta terminata l'assegnazione dei vincoli, il passo successivo è dare come input al solutore i collector necessari a seconda della tipologie di analisi che si vuole effettuare, nel nostro caso ne sono state seguite due: l'analisi modale e l'analisi lineare.

6.1 Analisi Modale

L'analisi modale è uno strumento che permette in maniera efficiente la comprensione del comportamento strutturale e rappresenta un metodo per acquisire informazioni sulla dinamica delle strutture. Qualsiasi velivolo o struttura generica è sottoposto a delle forze dinamiche che causano delle vibrazioni, nasce quindi la necessità di quantificare la risposta strutturale, in modo da poter verificare come questa influisca su fattori quali prestazioni e fatica.

È importante osservare e studiare le vibrazioni della struttura, in quanto potrebbero generare un problema di tipo immediato, oppure per la certificazione della struttura stessa rispetto a delle norme di costruzione o di collaudo. Tramite l'utilizzo dell'analisi agli elementi finiti è possibile determinare la vibrazione della struttura ed eseguire un'analisi in frequenza.

L'analisi modale calcola i modi di vibrare di una struttura, il periodo proprio di vibrazione associato ad ogni modo di vibrare (le frequenze naturali) e la massa partecipante eccitata in ciascun modo di vibrare. I modi di vibrare sono le configurazioni deformate per le quali lo spostamento di ciascun punto della struttura, lasciata libera di oscillare in assenza di smorzamento, è proporzionale in ogni istante allo spostamento di qualsiasi altro punto.

Un modo di vibrare si può anche definire come quella particolare configurazione deformata per la quale lo spostamento di ogni nodo della struttura, lasciata libera di oscillare, avrà un andamento sinusoidale in funzione del tempo.

6.2 Load step per l'analisi modale

Per la creazione del collector è necessario selezionare il comando **Create > Load Step input** raggiungibile attraverso il click destro nella Tab Area, esso ci permetterà la creazione e la modifica di una card nella sezione inferiore della Tab area.

Il metodo utilizzato è il Real Eigen Value Extraction, ovvero la risoluzione attraverso l'estrazione degli autovalori reali. I parametri principali sono quattro:

- la **Card Image**, nel nostro caso **EIGRL**
- il valore iniziale del range di frequenza **V1**
- il valore finale del range di frequenza **V2**
- il numero di modi di vibrare **ND**

Nel nostro caso non è necessaria la certificazione in un range di frequenza ma si vuole andare a verificare quelli che sono i modi propri di vibrare della struttura. Lasciando

vuoti i campi V1 e V2 infatti l'analisi verrà effettuata lungo tutto lo spettro di frequenza restituendo i valori delle frequenze naturali.

Name	Value
Solver Keyword:	Real Eigen Value Extraction
Name:	EIGRL
ID:	1
Include:	[Main Model]
Config type:	Real Eigen Value Extraction
Type:	EIGRL
V1:	
V2:	
ND:	10
MSGLVL:	
MAXSET:	
SHFACL:	
NORM:	

Metadata

Figura 48: Il load step input EIGRL

Una volta definito l'input per l'analisi modale è necessario creare un load step che definisca e racchiuda tutti i componenti inseriti e generati fino ad ora (mesh, vincoli, proprietà etc), in modo che possano interagire in maniera corretta e per definire gli output dell'analisi. Una volta creato il load step attraverso il comando **Create > Load Step** nella Tab Area, è necessario configurarlo nella maniera adeguata. I parametri da modificare sono i seguenti:

- **Analysis type**, per la tipologia di analisi, nel nostro caso **Normal modes**;
- **SPC**, per assegnare i vincoli di tipo single point constraint creati in precedenza;
- **METHOD(STRUCT)**, per assegnare la tipologia di risoluzione dell'analisi modale, nel nostro caso l'estrazione degli autovalori reali e quindi **EIGRL**
- **OUTPUT**, per scegliere quali dati verranno inseriti nei file di output generati dall'analisi, nel nostro caso la scelta è ricaduta su **Displacement**, gli spostamenti e **ESE**, Elemental Strain Energy che ci permetterà di visualizzare le parti del modello più sollecitate a livello energetico.

Una volta terminata la configurazione del load step sarà possibile lanciare l'analisi del solutore dall'area di lavoro attraverso la sezione **Analysis > Optistruct**, ancora una volta sarà necessario configurare il sotto-pannello impostando i parametri dell'analisi, nel nostro caso:

- in **export option** è necessario selezionare **all**, in modo tale da ottenere i dati di input impostati nel load step
- in **run options** occorre impostare **analysis** tra le opzioni disponibili

Impostati tali parametri è possibile lanciare l'analisi modale cliccando sul tab verde Optistruct.

Name	Value
Solver Keyword:	SUBCASE
Name:	modal_analysis
ID:	1
Include:	[Main Model]
User Comments:	Hide In Menu/Export
Subcase Definition	
Analysis type:	Normal modes
SPC:	(1) constraint
MPC:	<Unspecified>
METHOD (STRUCT):	(1) EIGRL
METHOD (FLUID):	<Unspecified>
STATSUB (PRELOAD):	<Unspecified>
SUBCASE OPTIONS	
LABEL:	<input checked="" type="checkbox"/>

Figura 49: Il load step EIGRL

6.3 Load collector per l'analisi lineare

Per analizzare il comportamento dell'elica sollecitata da forza centrifuga è stato necessario utilizzare il Load Collector RFORCE. Per la creazione del collector occorre selezionare il comando **Create > Load Collector** raggiungibile attraverso il click destro nella Tab Area, esso ci permetterà la creazione e la modifica di una card nella sezione inferiore della Tab area.

I parametri principali da configurare sono tre:

- **G**, il nodo della mesh o il punto della struttura lungo il quale agisce il vettore di rotazione, esso identifica il centro di rotazione
Se lasciato vuoto questo valore andrà automaticamente a impostare come centro di rotazione l'origine degli assi.
- **A**, l'intensità della rotazione o la velocità di rotazione, espressa in [rev/s]
- **R1,R2,R3**, le componenti rettangolari della direzione del vettore di rotazione, esse servono a identificare, l'inclinazione rispetto agli assi X,Y e Z del vettore di rotazione passante per le coordinate identificate dal nodo G.

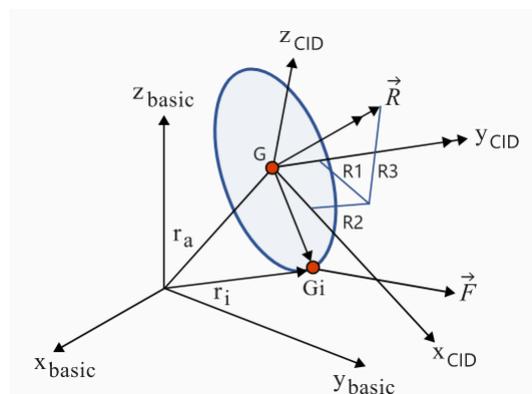


Figura 50: Rappresentazione grafica del comando RFORCE e dei suoi componenti

Per identificare in maniera esatta il centro di rotazione G è possibile ricorrere allo strumento distance accessibile nell'area di lavoro tramite **Geom > distance**. Esso permette di lavorare sia con le superfici che con le mesh precedentemente create. Basterà quindi andare nella sezione three nodes e cliccare su tre nodi facenti parte della superficie superiore o inferiore della circonferenza dell'albero. Essi saranno identificati dai colori verde blu e rosso e saranno identificati rispettivamente dai tag N1, N2 e N3 e ne verranno elencate le distanze tra loro e rispetto all'origine degli assi nei pannelli centrali. Una volta selezionati sarà necessario cliccare sul tab verde circle centre sulla destra e verrà generato un nodo di colore giallo che è il nostro centro di rotazione.

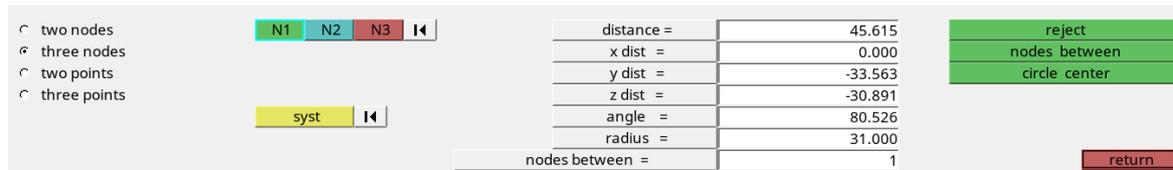


Figura 51: Il pannello distance

Per impostare la velocità angolare A invece sarà necessaria una semplice operazione di conversione di unità. Supponendo una velocità angolare di 100 [rad/s] infatti il valore corrispettivo in rivoluzioni al secondo è di 15.915 [rev/s] (1 [rev/s] corrisponde a circa 6.28 [rad/s]).

Per quanto riguarda il vettore [R1, R2, R3] è stato impostato come [1,0,0] in quanto l'asse di rotazione lungo il quale l'elica ruota è coincidente con l'asse X ed è perpendicolare alla superficie considerata.

Name	Value
Solver Keyword:	RFORCE
Name:	ROTATION
ID:	2
Color:	■
Include:	[Main Model]
Card Image:	RFORCE
User Comments:	Hide In Menu/Export
G:	(1733) Node
CID:	<Unspecified>
A:	15.91
R1:	1.0
R2:	0.0
R3:	0.0
RACC:	0.0
IDRF:	<Unspecified>
Metadata	

Figura 52: Il load collector RFORCE

Una volta definito l'input per l'analisi lineare è necessario creare il load step associato. Attraverso il comando **Create > Load Step** nella Tab Area, è possibile configurarlo nella maniera adeguata. I parametri da modificare sono i seguenti:

- **Analysis type**, per la tipologia di analisi, nel nostro caso **Linear static**;

- **SPC**, per assegnare i vincoli di tipo single point constraint creati in precedenza;
- **LOAD**, per assegnare il carico rotazionale, nel nostro caso **ROTATION**
- **OUTPUT**, per scegliere quali dati verranno inseriti nei file di output generati dall'analisi, nel nostro caso la scelta è ricaduta su **Displacement**, gli spostamenti e **ESE**, Elemental Strain Energy che ci permetterà di visualizzare le parti del modello più sollecitate a livello energetico.

Una volta terminata la configurazione del load step sarà possibile lanciare l'analisi del solutore dall'area di lavoro attraverso la sezione Analysis > Optistruct, ancora una volta sarà necessario configurare il sotto-pannello impostando i parametri dell'analisi, nel nostro caso:

- in **export option** è necessario selezionare **all**, in modo tale da ottenere i dati di input impostati nel load step
- in **run options** occorre impostare **analysis** tra le opzioni disponibili

Impostati tali parametri è possibile lanciare l'analisi modale cliccando sul tab verde Optistruct.

Name	Value
Solver Keyword:	SUBCASE
Name:	Rotation
ID:	1
Include:	[Main Model]
User Comments:	Hide In Menu/Export
Subcase Definition	
Analysis type:	Linear Static
SPC:	(1) constraint
LOAD:	(2) ROTATION
SUPPORT1:	<Unspecified>
PRETENSION:	<Unspecified>
MPC:	<Unspecified>
DEFORM:	<Unspecified>
MOTNJC:	<Unspecified>

Figura 53: Il load step ROTATION

7 Post-Processing

Una volta lanciata l'analisi la fase successiva è composta dal post-processing ovvero la valutazione e visualizzazione dei risultati dei calcoli effettuati dal software agli elementi finiti.

I file di output sono stati preimpostati nella fase finale dell'analisi, insieme ai parametri di cui si vuole calcolare l'entità e possono essere di due tipologie: file di testo e file interni del programma, i primi sono interpretabili da qualsiasi editor di testo libero e hanno il vantaggio di essere di piccole dimensioni, di conseguenza è più facile il loro trasferimento per eventuale post-processing su altri pc e non sono vincolati dall'utilizzo di un programma predefinito. Inoltre è possibile utilizzare questi file di testo per esportare i risultati in programmi con funzionalità più avanzate per tracciare grafici o semplicemente effettuare elaborazione e comparazione dei dati, tali file però hanno però lo svantaggio di presentare i dati richiesti in forma grezza, non processata, di conseguenza è difficile valutare, ad esempio nel caso degli spostamenti o delle deformazioni, le zone in cui sono concentrate o i valori massimi e minimi di quest'ultimi.

Per questo motivo spesso si preferisce utilizzare la seconda tipologia di file, solitamente vincolata al programma utilizzato per l'analisi, ma con il vantaggio di un'elaborazione in tempo reale e grafica dei dati ottenuti. Nel nostro caso abbiamo ottenuto dall'analisi due file di tipo testuale e due file interni ad Hypermesh. I primi sono caratterizzati dal formato .out e .stat ed è stato possibile valutarli con un editor di testo quale Notepad++, mentre gli altri due file di output sono interni alla suite di Hyperworks, uno dal formato .h3d, valutabile grazie al programma HyperView Player, limitato alla visualizzazione grafica dei risultati ottenuti e il secondo dal formato .mvw, che è possibile aprire in HyperWorks Desktop per una valutazione grafica e un'elaborazione dei risultati diretta.

Come descritto in precedenza è utile in alcuni casi osservare i dati in formato grezzo per estrapolare solo le informazioni che riteniamo necessarie, ad esempio nel caso dell'analisi modale, utilizzando un editor di testo per aprire il file di tipo .out è possibile ricavare le frequenze proprie e gli autovalori dell'analisi effettuata.

```
Volume = 5.81854E+04 Mass = 1.57101E-04
Subcase Mode Frequency Eigenvalue Generalized Stiffness Generalized Mass
1 1 3.305320E+01 4.313074E+04 4.313074E+04 1.000000E+00
1 2 3.305879E+01 4.314532E+04 4.314532E+04 1.000000E+00
1 3 1.785832E+02 1.259044E+06 1.259044E+06 1.000000E+00
1 4 1.786145E+02 1.259485E+06 1.259485E+06 1.000000E+00
1 5 2.326846E+02 2.137445E+06 2.137445E+06 1.000000E+00
1 6 2.326874E+02 2.137497E+06 2.137497E+06 1.000000E+00
1 7 4.727652E+02 8.823702E+06 8.823702E+06 1.000000E+00
1 8 4.727744E+02 8.824044E+06 8.824044E+06 1.000000E+00
1 9 7.115812E+02 1.998981E+07 1.998981E+07 1.000000E+00
1 10 7.115867E+02 1.999012E+07 1.999012E+07 1.000000E+00
*****
ANALYSIS COMPLETED.
*****
```

Figura 54: I risultati dell'analisi modale mesh 1mm spessore 1mm

Per quanto riguarda la visualizzazione grafica invece è possibile scegliere di utilizzare HyperView Player per una presentazione dei risultati semplice ma molto limitata. Aprendo il programma infatti sarà possibile vedere l'evoluzione degli spostamenti durante l'analisi modale, ma non è possibile vedere come questi siano distribuiti all'interno del modello, dove siano presenti i massimi e i minimi di tale parametro e non risulta di pratico utilizzo visualizzare il passaggio da un modo all'altro di vibrare.

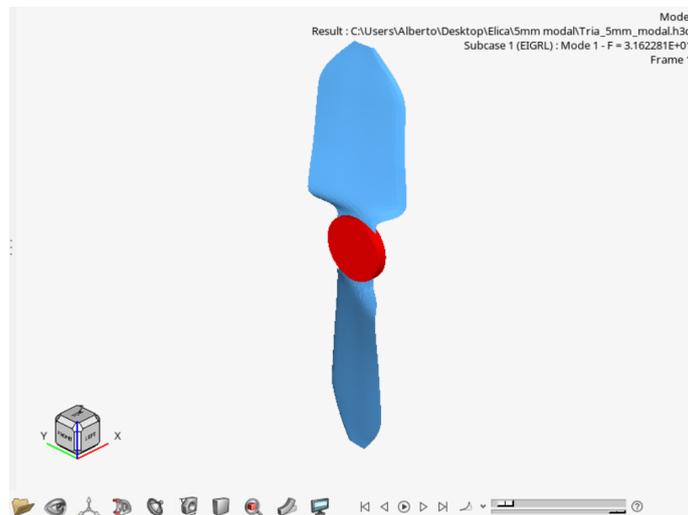


Figura 55: La visualizzazione dei dati in HyperView

Per questo motivo è preferibile utilizzare HyperWorks Desktop per una visualizzazione più completa e pratica dei risultati ottenuti. Una volta aperto il file .mvw infatti è possibile, utilizzando il comando **Contour** accedere al pannello dedicato al post processing dei risultati. Nella sezione sinistra del pannello è possibile selezionare tre opzioni:

- **Eigen Mode/Displacement**, che permette di visualizzare graficamente le deformazioni e/o indica le frequenze proprie;
- **Element Stress**, che permette di visualizzare quali elementi risultano particolarmente sollecitati a livello di tensione durante l'analisi modale;
- **Element Strain**, che permette di visualizzare graficamente quali elementi vengono maggiormente deformati.

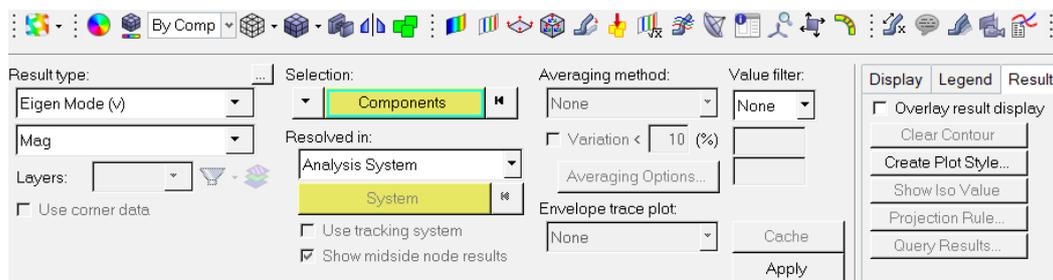


Figura 56: Il pannello Contour

Se si seleziona il tab Eigen mode è possibile scegliere le componenti lungo quali visualizzare i risultati tra, X, Y, Z e Mag, che indica una visualizzazione mista mediata dei valori sugli assi x,y e z. Se invece si seleziona il tab Element Stress/Strain invece sarà possibile scegliere il criterio con cui vengono calcolate le tensioni (vonMises, Signed vonMises, P1(major), P2(mid), P3(minor), Pressure etc.)

Nel pannello Contour è presente inoltre un'importante sezione chiamata **Averaging Method**, utilizzata per calcolare la media dei risultati e coadiuvare la visualizzazione grafica questo comando infatti permette di rendere il risultato grafico più simile ad un risultato reale. Prendendo ad esempio la mesh a 5 mm, i triangoli che la compongono sono di dimensioni ridotte e possono contenere massimi e minimi in zone relativamente vicine tra loro e la mesh non è altro che una divisione di un elemento continuo in piccoli elementi uniti tra loro, l'oggetto reale però resta un continuo e potrebbe esserci una discrepanza tra i risultati ottenuti e quelli reali, per ovviare a questo problema è possibile effettuare un'operazione più o meno avanzata di media sui risultati ottenuti. Le possibili opzioni del comando Averaging sono:

- **Simple**, significa che le componenti di tensori e vettori sono estratte e le invarianti sono calcolate prima dell'operazione di media.
- **Advanced**, significa che il risultati di tensori (o vettori) sono trasformati in un sistema associato e successivamente su ogni componente viene operata la media per ottenere un tensore medio (o un vettore medio).
- **Difference**, la differenza nodale è la differenza tra il risultato massimo e minimo negli angoli di ogni nodo.
- **Max of corner**, significa che viene estratto il valore massimo di ogni angolo di un elemento e il valore viene indicato nel baricentro dell'elemento.
- **Min of corner**, significa che viene estratto il valore minimo di ogni angolo di un elemento e il valore viene indicato nel baricentro dell'elemento.
- **Extreme of corner**,significa che viene estratto il valore estremo di ogni angolo di un elemento e il valore viene indicato nel baricentro dell'elemento.
- **Maximum**, significa che viene estratto il valore massimo dagli elementi circostanti attaccati al nodo considerato.
- **Minimum**, significa che viene estratto il valore minimo dagli elementi circostanti attaccati al nodo considerato.

Per le opzioni Simple e Advanced è possibile impostare un valore di variazione in percentuale, per non rischiare di eliminare valori significativi dai risultati ottenuti con l'operazione di averaging. Ad esempio se la variazione dei risultati dopo l'operazione di media è superiore del 10% rispetto al valore iniziale, tale valore viene annullato e viene ripristinato il valore iniziale ottenuto dall'analisi.

Nella sezione **Value filter**, è possibile inoltre impostare un filtro ai risultati, ad esempio imponendo un range di valori in cui visualizzare l'esito dell'analisi, oppure impostando

un valore limite e imponendo che vengano filtrati tutti i valori minori o maggiori del parametro impostato.

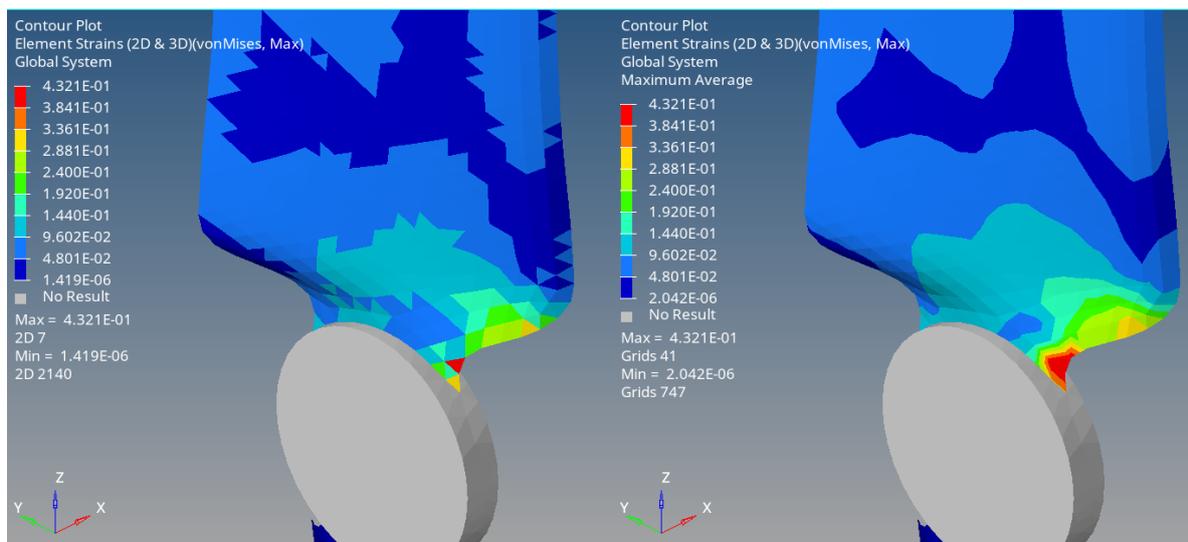


Figura 57: La differenza tra un risultato grafico senza e con operazione di averaging

Una volta avviata l'animazione video attraverso il comando Start/Pause Animation è possibile adattarla alle proprie esigenze in diversi modi. È possibile infatti che la visualizzazione grafica non soddisfi a pieno ciò che viene richiesto o che risulti esagerata o troppo poco visibile nel caso di spostamenti molto piccoli. In questo caso è possibile utilizzare il comando **Deformed** che ci consente di scalare l'animazione in 3 diversi modi:

- **Scale factor**, attraverso un fattore di scala l'intera animazione verrà ridotta o amplificata per soddisfare la richiesta dell'utente
- **Model percent**, inserendo un valore in percentuale sarà possibile riscalarla l'animazione ottenuta rispetto alle dimensioni del modello
- **Model item**, inserendo un valore fisso, ipotizzato dall'utente l'animazione viene amplificata o ridotta in maniera fissa

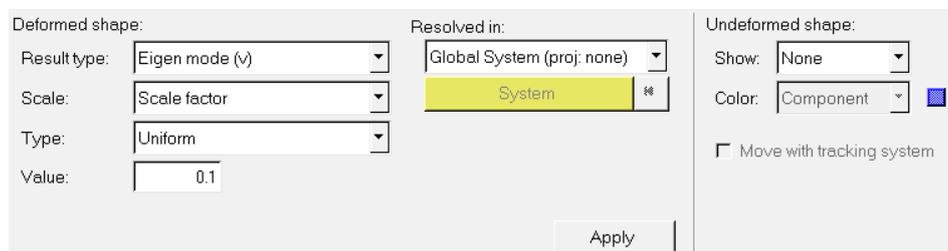


Figura 58: Il pannello Deformed

Per tutte e tre le tipologie di scala dell'animazione è possibile poi decidere se effettuarla in maniera uniforme al modello oppure lungo uno specifico asse (x,y,z) deformando l'animazione, indicando il fattore o i fattori che influenzano tale deformazione.

È possibile inoltre visualizzare la forma indeformata del modello facendola risaltare durante l'animazione, in modo da avere a livello visivo una panoramica completa di ciò che accade durante la simulazione. Per fare ciò basta attivare il tab Wireframe, per visualizzare la mesh completa, o Edge, per visualizzare solo i bordi del modello, nella sezione Undeformed Shape.

È inoltre possibile modificare i parametri dell'animazione video nella sezione **Animation Controls**, attraverso questo pannello, caratterizzato da slider e caselle di spunta, si interagisce con:

- **Number of steps**, gli step dell'animazione, andando a modificare il numero di step, si decide il numero di frame massimo che andrà a comporre il video;
- **Frames/sec**, i frames per secondo, impostando il Frame Rate massimo, si sceglie il numero di frame utilizzati in un secondo dall'animazione, per un animazione più fluida è consigliato non scendere al di sotto del valore 30;
- **Increments**, gli incrementi contati in step, il numero di blocchi di step in cui è possibile far partire l'animazione o bloccare il video;
- **Bounce e Current**, altri valori inerenti alla visualizzazione grafica dei risultati, il primo che indica se scegliere una visualizzazione più armoniosa dell'animazione e il secondo indica il frame esatto in cui si trova l'animazione, attraverso uno slider è possibile passare al blocco di step successivo indicato in precedenza nel valore degli incrementi.

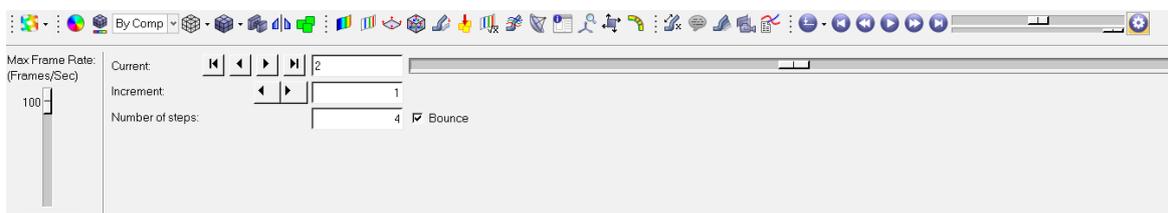


Figura 59: Il pannello Animation Controls

Nel caso specifico dell'analisi modale è inoltre possibile passare da un modo di vibrare all'altro attraverso il pannello **Subcase**, in questa sezione infatti è indicato il numero associato al modo di vibrare e una volta selezionato, l'intera animazione e visualizzazione grafica verrà ricalibrata per mostrare i risultati inerenti al subcase selezionato.

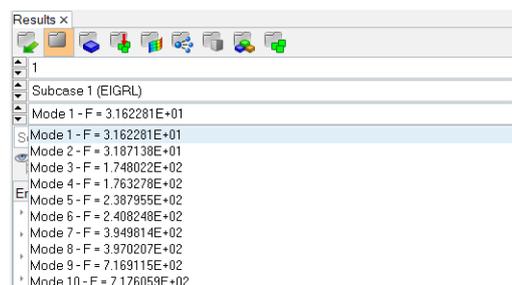


Figura 60: Il pannello Subcases

8 Risultati Analisi Modale

8.1 Analisi modale mesh 1mm

Mode	Frequency	Eigenvalue	Stiffness
1	3.305320E+01	4.313074E+04	4.313074E+04
2	3.305879E+01	4.314532E+04	4.314532E+04
3	1.785832E+02	1.259044E+06	1.259044E+06
4	1.786145E+02	1.259485E+06	1.259485E+06
5	2.326846E+02	2.137445E+06	2.137445E+06
6	2.326874E+02	2.137497E+06	2.137497E+06
7	4.727652E+02	8.823702E+06	8.823702E+06
8	4.727744E+02	8.824044E+06	8.824044E+06
9	7.115812E+02	1.998981E+07	1.998981E+07
10	7.115867E+02	1.999012E+07	1.999012E+07

Tabella 3: Risultati analisi modale spessore 1mm con mesh da 1mm

Mode	Frequency	Eigenvalue	Stiffness
1	2.676039E+01	2.827123E+04	2.827123E+04
2	2.676505E+01	2.828106E+04	2.828106E+04
3	1.488297E+02	8.744575E+05	8.744575E+05
4	1.488410E+02	8.745910E+05	8.745910E+05
5	1.961682E+02	1.519207E+06	1.519207E+06
6	1.961826E+02	1.519430E+06	1.519430E+06
7	4.028140E+02	6.405734E+06	6.405734E+06
8	4.028150E+02	6.405764E+06	6.405764E+06
9	5.402255E+02	1.152152E+07	1.152152E+07
10	5.402290E+02	1.152167E+07	1.152167E+07

Tabella 4: Risultati analisi modale spessore 0.7mm con mesh da 1mm

Mode	Frequency	Eigenvalue	Stiffness
1	3.833004E+01	5.800137E+04	5.800137E+04
2	3.834055E+01	5.803320E+04	5.803320E+04
3	2.065740E+02	1.684655E+06	1.684655E+06
4	2.066237E+02	1.685466E+06	1.685466E+06
5	2.647185E+02	2.766485E+06	2.766485E+06
6	2.647249E+02	2.766619E+06	2.766619E+06
7	5.334811E+02	1.123564E+07	1.123564E+07
8	5.335011E+02	1.123648E+07	1.123648E+07
9	8.575231E+02	2.903029E+07	2.903029E+07
10	8.575343E+02	2.903105E+07	2.903105E+07

Tabella 5: Risultati analisi modale spessore 1.3mm con mesh da 1mm

8.2 Analisi modale mesh 2mm

Mode	Frequency	Eigenvalue	Stiffness
1	3.445666E+01	4.687119E+04	4.687119E+04
2	3.446575E+01	4.689593E+04	4.689593E+04
3	1.824240E+02	1.313783E+06	1.313783E+06
4	1.824316E+02	1.313893E+06	1.313893E+06
5	2.382058E+02	2.240084E+06	2.240084E+06
6	2.382201E+02	2.240354E+06	2.240354E+06
7	4.789739E+02	9.056982E+06	9.056982E+06
8	4.789862E+02	9.057444E+06	9.057444E+06
9	7.190088E+02	2.040930E+07	2.040930E+07
10	7.190383E+02	2.041098E+07	2.041098E+07

Tabella 6: Risultati analisi modale spessore 1mm con mesh da 2mm

Mode	Frequency	Eigenvalue	Stiffness
1	3.445666E+01	4.687119E+04	4.687119E+04
2	3.446575E+01	4.689593E+04	4.689593E+04
3	1.824240E+02	1.313783E+06	1.313783E+06
4	1.824316E+02	1.313893E+06	1.313893E+06
5	2.382058E+02	2.240084E+06	2.240084E+06
6	2.382201E+02	2.240354E+06	2.240354E+06
7	4.789739E+02	9.056982E+06	9.056982E+06
8	4.789862E+02	9.057444E+06	9.057444E+06
9	7.190088E+02	2.040930E+07	2.040930E+07
10	7.190383E+02	2.041098E+07	2.041098E+07

Tabella 7: Risultati analisi modale spessore 0.7mm con mesh da 2mm

Mode	Frequency	Eigenvalue	Stiffness
1	3.989972E+01	6.284916E+04	6.284916E+04
2	3.990823E+01	6.287598E+04	6.287598E+04
3	2.106303E+02	1.751465E+06	1.751465E+06
4	2.106372E+02	1.751580E+06	1.751580E+06
5	2.693848E+02	2.864876E+06	2.864876E+06
6	2.693997E+02	2.865194E+06	2.865194E+06
7	5.396192E+02	1.149568E+07	1.149568E+07
8	5.396431E+02	1.149669E+07	1.149669E+07
9	8.669051E+02	2.966899E+07	2.966899E+07
10	8.669795E+02	2.967409E+07	2.967409E+07

Tabella 8: Risultati analisi modale spessore 1.3mm con mesh da 2mm

8.3 Analisi modale mesh 5mm

Mode	Frequency	Eigenvalue	Stiffness
1	3.162281E+01	3.947850E+04	3.947850E+04
2	3.187138E+01	4.010157E+04	4.010157E+04
3	1.748022E+02	1.206295E+06	1.206295E+06
4	1.763278E+02	1.227443E+06	1.227443E+06
5	2.387955E+02	2.251189E+06	2.251189E+06
6	2.408248E+02	2.289613E+06	2.289613E+06
7	3.949814E+02	6.159041E+06	6.159041E+06
8	3.970207E+02	6.222802E+06	6.222802E+06
9	7.169115E+02	2.029041E+07	2.029041E+07
10	7.176059E+02	2.032974E+07	2.032974E+07

Tabella 9: Risultati analisi modale spessore 1mm con mesh da 5mm

Mode	Frequency	Eigenvalue	Stiffness
1	2.450283E+01	2.370240E+04	2.370240E+04
2	2.469707E+01	2.407968E+04	2.407968E+04
3	1.444088E+02	8.232786E+05	8.232786E+05
4	1.452398E+02	8.327811E+05	8.327811E+05
5	1.952589E+02	1.505156E+06	1.505156E+06
6	1.975091E+02	1.540046E+06	1.540046E+06
7	3.280071E+02	4.247431E+06	4.247431E+06
8	3.304328E+02	4.310483E+06	4.310483E+06
9	5.335901E+02	1.124023E+07	1.124023E+07
10	5.339512E+02	1.125545E+07	1.125545E+07

Tabella 10: Risultati analisi modale spessore 0.7mm con mesh da 5mm

Mode	Frequency	Eigenvalue	Stiffness
1	3.773184E+01	5.620508E+04	5.620508E+04
2	3.810296E+01	5.731616E+04	5.731616E+04
3	2.029361E+02	1.625842E+06	1.625842E+06
4	2.050945E+02	1.660610E+06	1.660610E+06
5	2.753201E+02	2.992511E+06	2.992511E+06
6	2.771121E+02	3.031592E+06	3.031592E+06
7	4.562901E+02	8.219431E+06	8.219431E+06
8	4.582747E+02	8.291089E+06	8.291089E+06
9	8.747869E+02	3.021094E+07	3.021094E+07
10	8.762708E+02	3.031353E+07	3.031353E+07

Tabella 11: Risultati analisi modale spessore 1.3mm con mesh da 5mm

Per una più semplice visualizzazione dei risultati si è scelto di estrapolare i dati delle frequenze e separarli per spessore dell'elica, evidenziando la dimensione della mesh.

Mode	Frequency [Hz] [5mm]	Frequency [Hz] [2mm]	Frequency [Hz] [1mm]
1	31.62281	34.45666	33.0532
2	31.87138	34.46575	33.05879
3	174.8022	182.4241	178.5832
4	176.3278	182.4316	178.6145
5	238.7955	238.2058	232.6846
6	240.8248	238.2201	232.6874
7	394.9814	478.9739	472.7652
8	397.0207	478.9862	472.7744
9	716.9115	719.0088	711.5812
10	717.6059	719.0383	711.5867

Tabella 12: Risultati frequenze analisi modale spessore 1mm

Mode	Frequency [Hz] [5mm]	Frequency [Hz] [2mm]	Frequency [Hz] [1mm]
1	24.50283	28.0362	26.76039
2	24.69707	28.04602	26.76505
3	144.4088	152.3237	148.8297
4	145.2398	152.3322	148.841
5	195.2589	202.5984	196.1682
6	197.5091	202.6217	196.1826
7	328.0071	408.9223	402.814
8	330.4328	408.9235	402.815
9	533.5901	546.3642	540.2255
10	533.9512	546.3732	540.229

Tabella 13: Risultati frequenze analisi modale spessore 0.7mm

Mode	Frequency [Hz] [5mm]	Frequency [Hz] [2mm]	Frequency [Hz] [1mm]
1	37.73184	39.89972	38.33004
2	38.10296	39.90823	38.34055
3	202.9361	210.6303	206.574
4	205.0945	210.6372	206.6237
5	275.3201	269.3848	264.7185
6	277.1121	269.3997	264.7249
7	456.2901	539.6192	533.4811
8	458.2747	539.6431	533.5011
9	874.7869	866.9051	857.5231
10	876.2708	866.9795	857.5343

Tabella 14: Risultati frequenze analisi modale spessore 1.3mm

8.4 Confronto risultati e descrizione

È possibile effettuare un'analisi dei risultati ottenuti andando ad osservare le coppie di frequenze associate ai modi di vibrare. Se osserviamo le differenze, sia in valore assoluto che in percentuale è possibile notare un andamento convergente dei risultati, ovvero che le frequenze stesse tendano alle stesse coppie di valori.

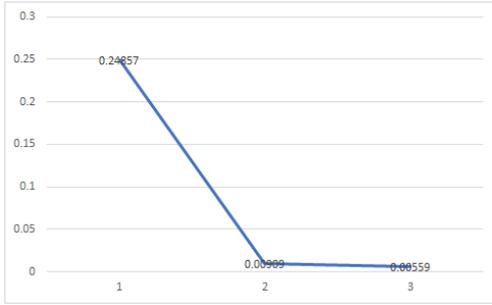
Di seguito sono indicate le tabelle con le differenze in valore assoluto e in percentuale dei modi di vibrare prendendo in considerazione le coppie 1-2 3-4 5-6 7-8 9-10.

Mode	[5mm]	[2mm]	[1mm]	[5mm][%]	[2mm][%]	[1mm][%]
1-2	0.24857	0.00909	0.00559	0.786046528	0.026380967	0.01691213
3-4	1.5256	0.0076	0.0313	0.872757894	0.004166118	0.017526845
5-6	2.0293	0.0143	0.0028	0.849806634	0.006003212	0.001203346
7-8	2.0393	0.0123	0.0092	0.516302793	0.00256799	0.001945998
9-10	0.6944	0.0295	0.0055	0.096859933	0.004102871	0.000772927

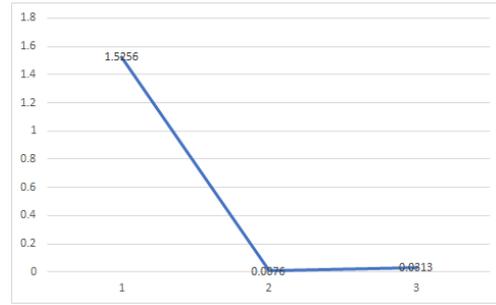
Tabella 15: Risultati frequenze analisi modale spessore 1mm

Nello specifico è possibile notare che le differenze che caratterizzano i valori delle frequenze sono passate da percentuali comprese tra 0.5 e 0.9 % per la mesh a 5mm a percentuali in un range che va da 0.002 a 0.004% passando alla mesh a 2mm, un cambiamento di 2 ordini di grandezza per una precisione ed accuratezza dei calcoli effettuati imparagonabile, soprattutto se si considera la differenza di tempo necessaria a livello computazionale per la risoluzione dell'analisi.

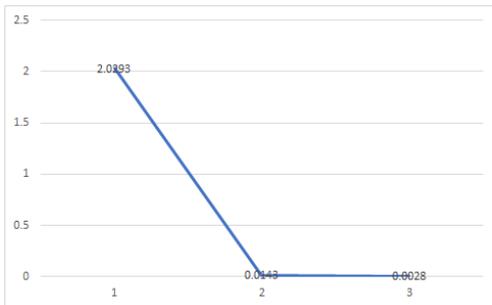
Un ulteriore miglioramento si ha passando alla mesh a 1mm ma questa volta molto meno marcato rispetto alla differenza del passaggio da 5mm a 2 mm, l'ordine di grandezza rimarrà pressochè lo stesso mentre le differenze in percentuale del caso 1mm saranno in un intervallo che è tra metà e un sesto della differenza precedente (2mm). È possibile valutare l'andamento di questi valori a livello grafico per capire meglio l'estensione di questa ottimizzazione, nei seguenti grafici infatti sono state diagrammate le differenze, sia in valore assoluto che in percentuale delle 3 mesh realizzate di dimensione 5 mm, 2mm e 1mm.



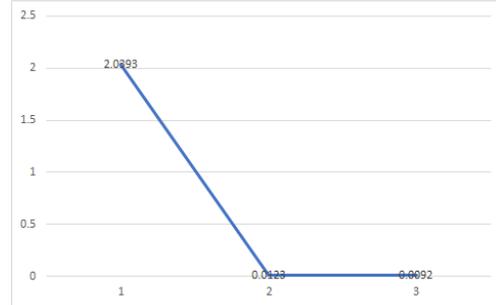
Andamento differenze Modo 1-2 [s=1mm]



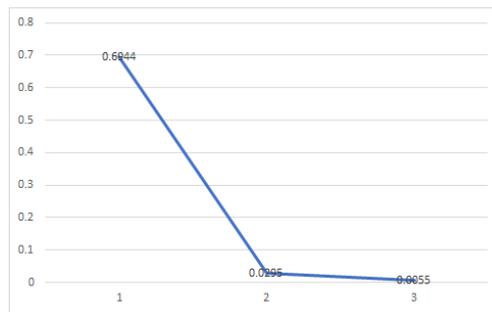
Andamento differenze Modo 3-4 [s=1mm]



Andamento differenze Modo 5-6 [s=1mm]



Andamento differenze Modo 7-8 [s=1mm]

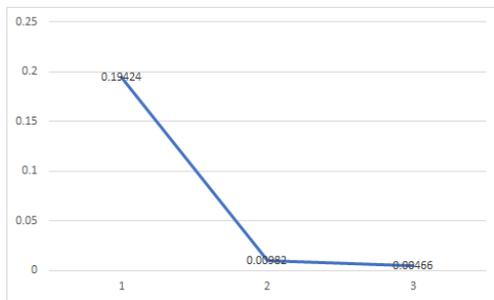


Andamento differenze Modo 9-10 [s=1mm]

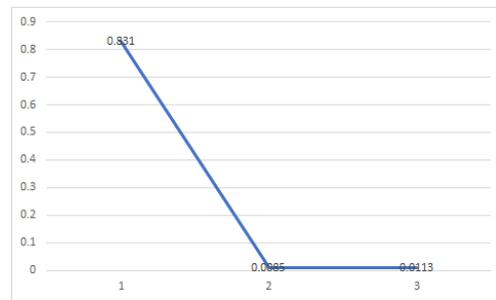
È possibile effettuare lo stesso procedimento di analisi dei risultati per gli spessori da 0.7mm e 1.3mm ottenendo le tabelle 16 & 17 e i grafici degli andamenti.

Mode	[5mm]	[2mm]	[1mm]	[5mm][%]	[2mm][%]	[1mm][%]
1-2	0.19424	0.00982	0.00466	0.792724759	0.035026145	0.017413797
3-4	0.831	0.0085	0.0113	0.575449696	0.005580222	0.007592571
5-6	2.2502	0.0233	0.0144	1.152418661	0.011500584	0.007340639
7-8	2.4257	0.0012	0.001	0.739526675	0.000293454	0.000248254
9-10	0.3611	0.009	0.0035	0.067673669	0.001647253	0.000647878

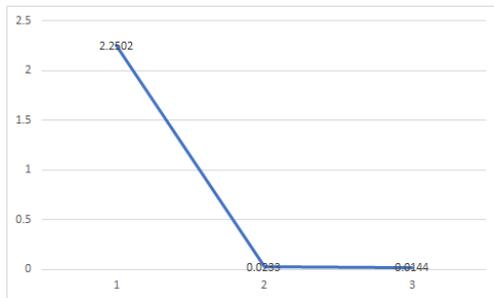
Tabella 16: Risultati frequenze analisi modale spessore 0.7mm



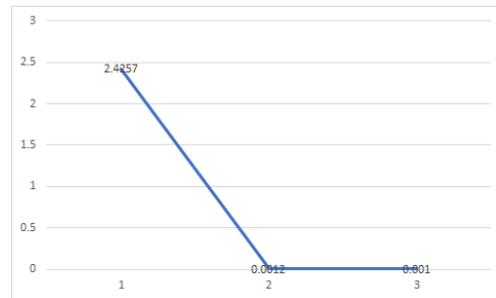
Andamento differenze Modo 1-2 [s=0.7mm]



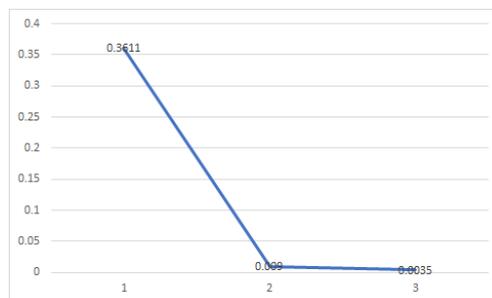
Andamento differenze Modo 3-4 [s=0.7mm]



Andamento differenze Modo 5-6 [s=0.7mm]



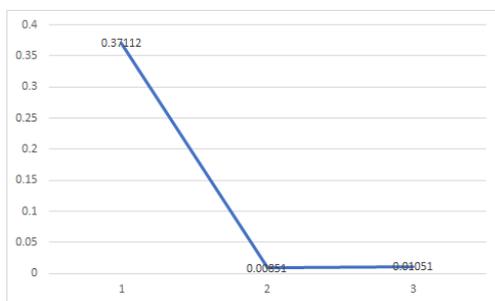
Andamento differenze Modo 7-8 [s=0.7mm]



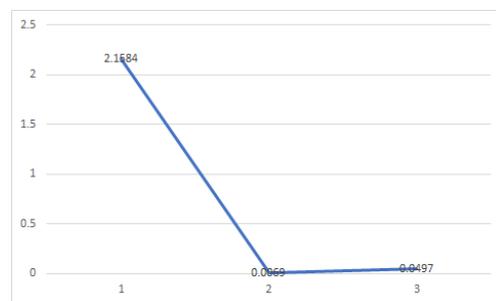
Andamento differenze Modo 9-10 [s=0.7mm]

Mode	[5mm]	[2mm]	[1mm]	[5mm][%]	[2mm][%]	[1mm][%]
1-2	0.37112	0.00851	0.01051	0.983572495	0.02132847	0.027419747
3-4	2.1584	0.0069	0.0497	1.063586025	0.003275882	0.024059175
5-6	1.792	0.0149	0.0064	0.650878741	0.005531121	0.002417663
7-8	1.9846	0.0239	0.02	0.434942595	0.004429049	0.003748961
9-10	1.4839	0.0744	0.0112	0.169629884	0.008582254	0.001306087

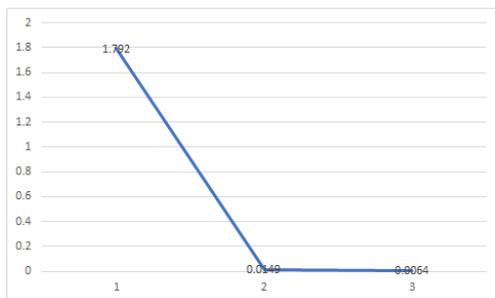
Tabella 17: Risultati frequenze analisi modale spessore 1.3mm



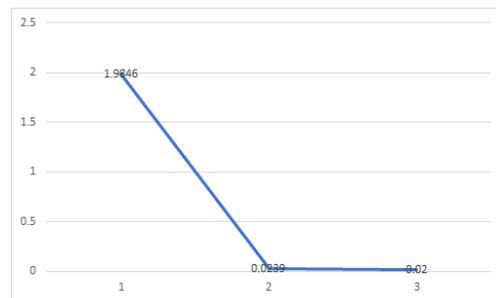
Andamento differenze Modo 1-2 [s=1.3mm]



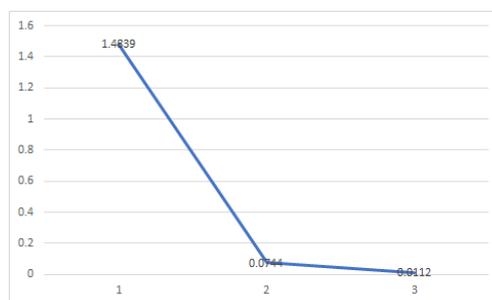
Andamento differenze Modo 3-4 [s=1.3mm]



Andamento differenze Modo 5-6 [s=1.3mm]



Andamento differenze Modo 7-8 [s=1.3mm]



Andamento differenze Modo 9-10 [s=1.3mm]

Anche in questo caso è possibile notare che le differenze che caratterizzano i valori delle frequenze sono passate da percentuali comprese tra l'1 % e 0.5% per la mesh a 5mm a percentuali in un range che va da 0.003 a 0.001% passando alla mesh a 2mm, un cambiamento di 3 ordini di grandezza per una precisione ed accuratezza dei calcoli effettuati imparagonabile, soprattutto se si considera la differenza di tempo necessaria a livello computazionale per la risoluzione dell'analisi.

Un ulteriore miglioramento si ha passando alla mesh a 1mm ma questa volta molto meno marcato rispetto alla differenza del passaggio da 5mm a 2 mm, l'ordine di grandezza rimarrà pressochè lo stesso mentre le differenze in percentuale del caso 1mm saranno in un intervallo che è tra metà e un decimo della differenza precedente (2mm).

È possibile concludere quindi che il passaggio dalla mesh da 5mm a quella da 2mm è un'ottimizzazione migliore rispetto al passaggio a quella ad 1mm, in virtù dei tempi di calcolo necessari e del costo computazionale maggiore richiesto al processore.

8.5 Visualizzazione grafica dei risultati

Come specificato nella sezione precedente è possibile utilizzare gli strumenti interni di HyperWorks per ottenere una visualizzazione grafica dei risultati ottenuti. Nel caso dell'analisi modale è possibile visualizzare la distribuzione degli spostamenti suddivisi in Subcase, rappresentanti i differenti modi di vibrare.

È visibile immediatamente come la distribuzione per tutti i modi di vibrare risulti simmetrica rispetto al modello e come i primi 2 modi di vibrare risultino avere una distribuzione degli spostamenti che richiama quella dell'analisi lineare con deformazioni più marcate nella zona del tip dell'elica e meno pronunciate nella zona vicino all'albero.

Nei modi di vibrare 3-4 e 5-6 la distribuzione varia vistosamente, con la zona di maggior deformazione concentrata nelle zone laterali al tip, mentre nei casi 7-8 e 9-10 la zona interessata da forti spostamenti è nuovamente il tip dell'elica con in particolare nel caso 9-10 la formazione di 3 punti di deformazione massima, uno al tip e due nelle zone laterali ad esso.

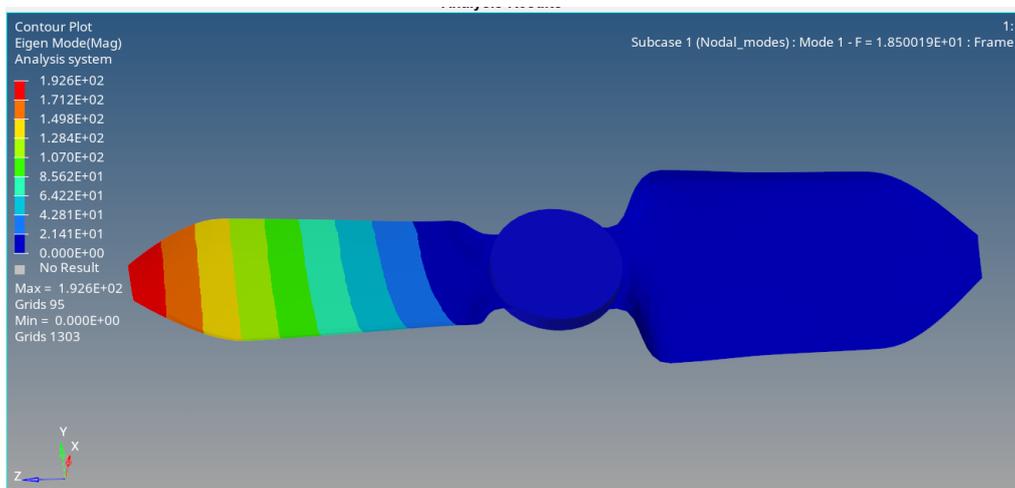


Figura 61: Modi di vibrare 1

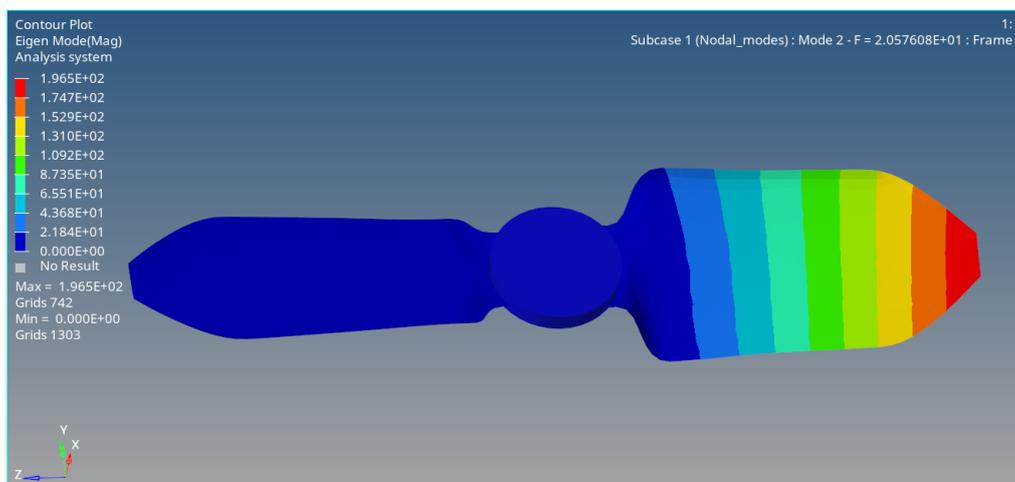


Figura 62: Modi di vibrare 2

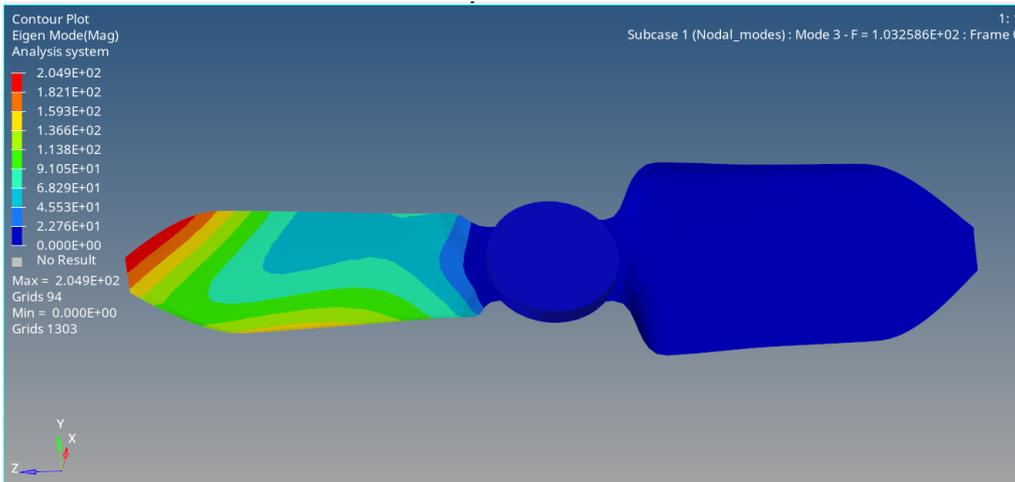


Figura 63: Modi di vibrare 3

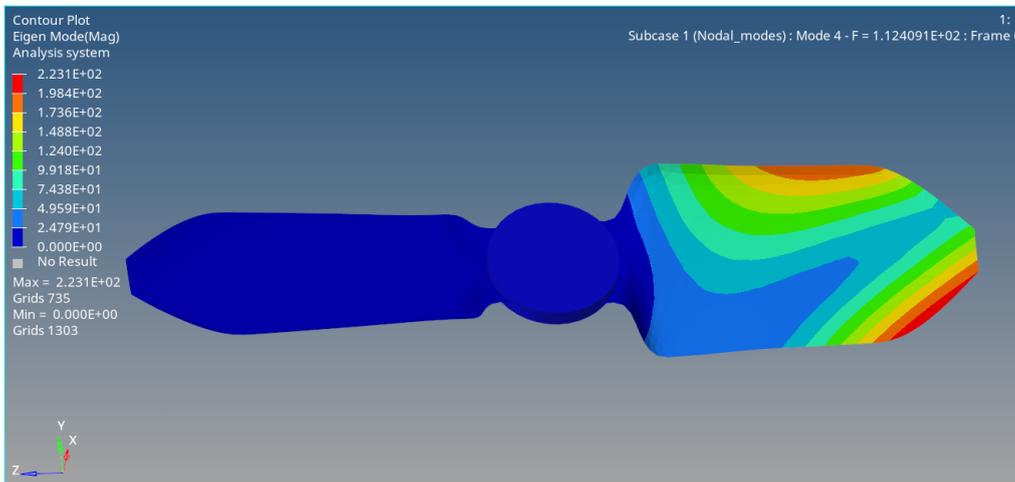


Figura 64: Modi di vibrare 4

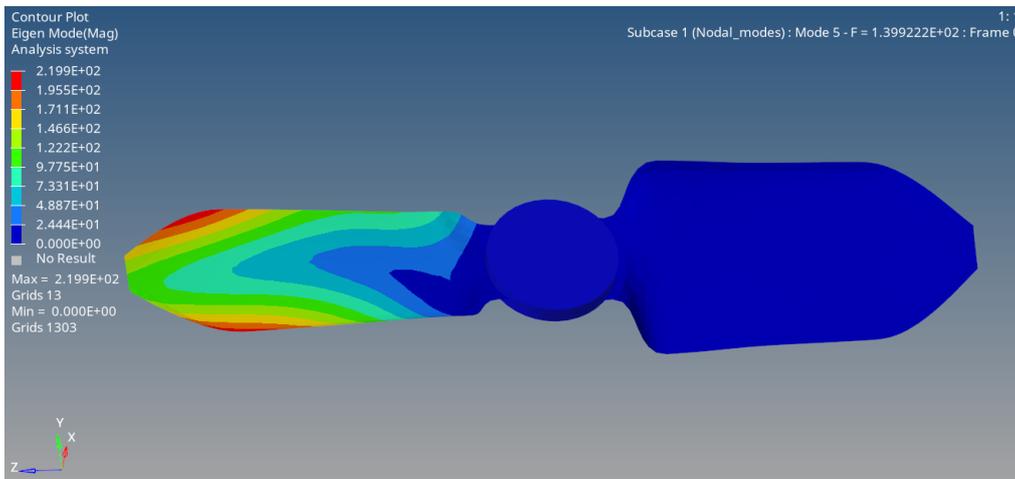


Figura 65: Modi di vibrare 5

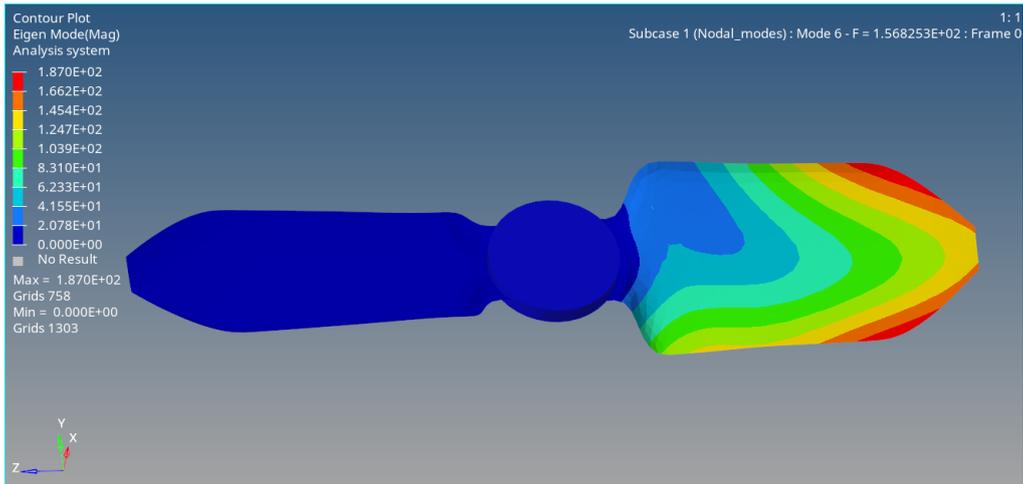


Figura 66: Modi di vibrare 6

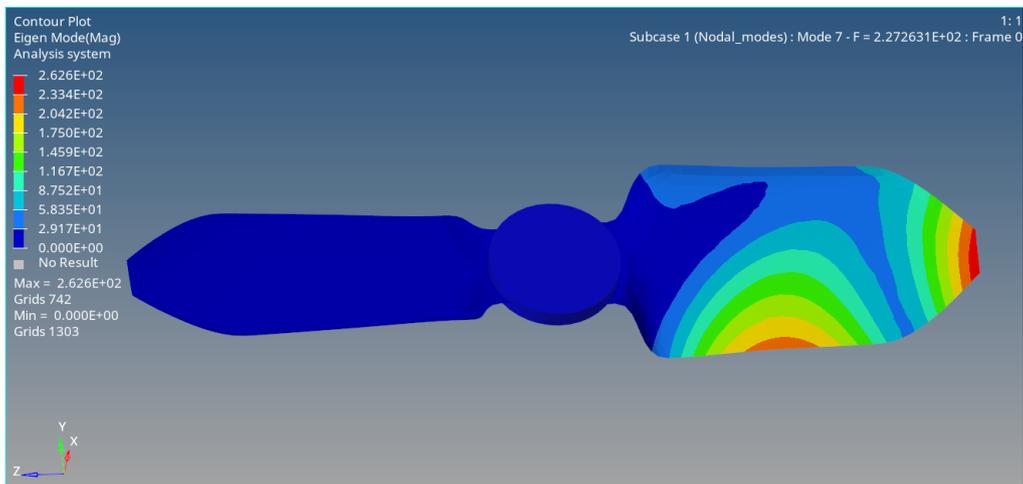


Figura 67: Modi di vibrare 7

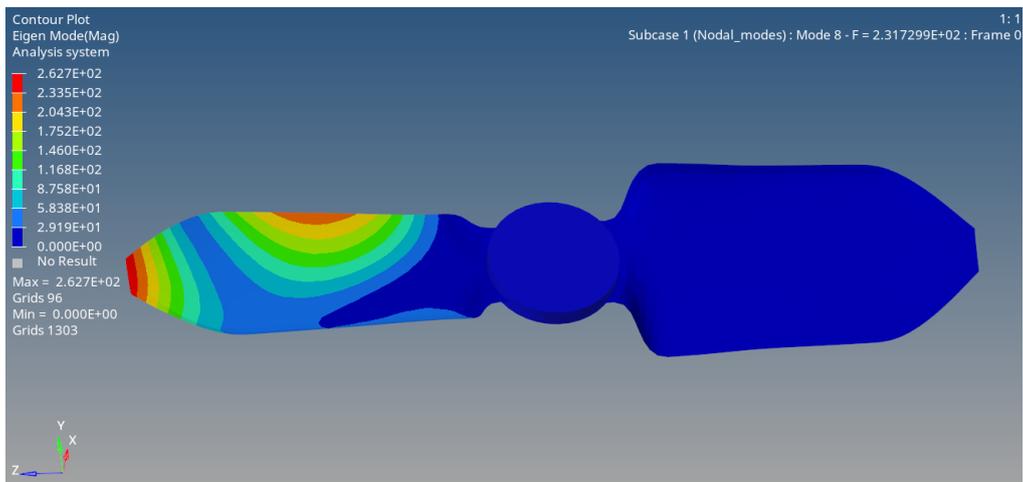


Figura 68: Modi di vibrare 8

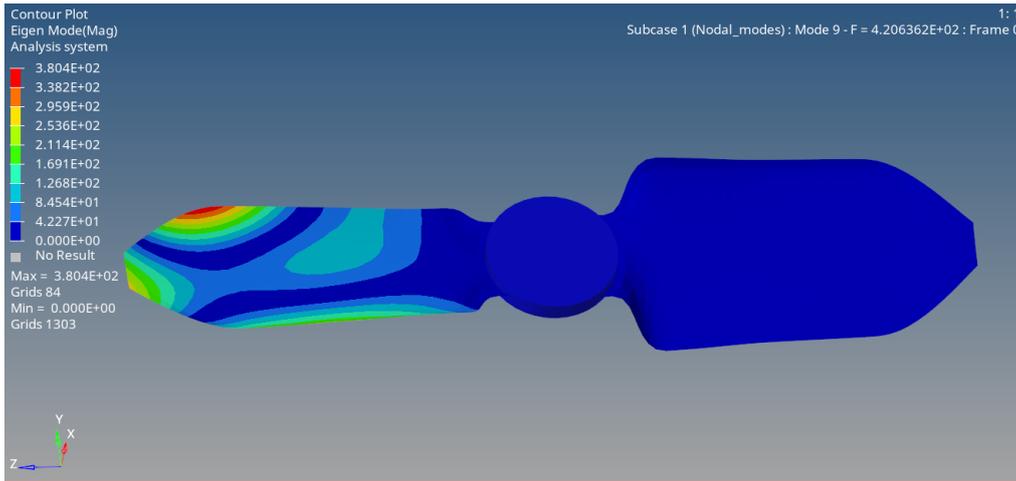


Figura 69: Modi di vibrare 9

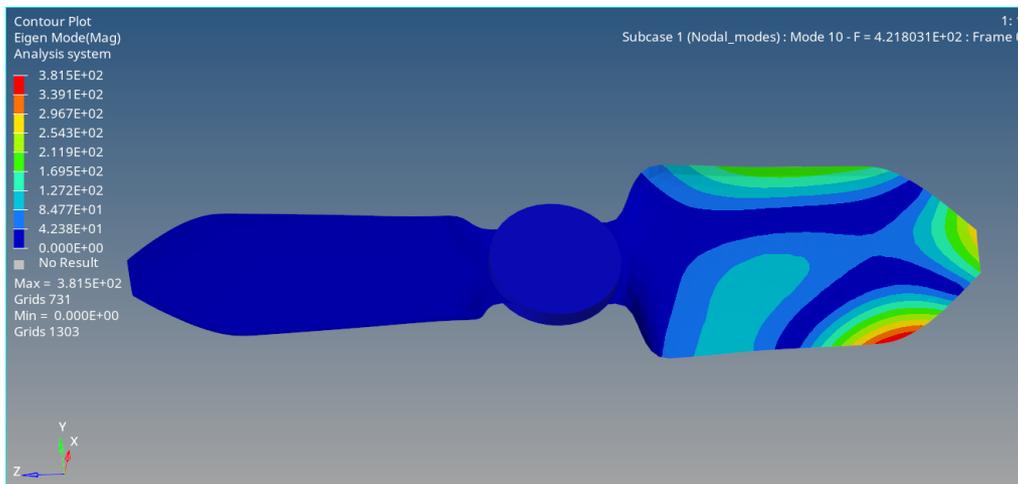


Figura 70: Modi di vibrare 10

È possibile inoltre visualizzare la distribuzione dell'Element Strain Energy nella mesh ovvero quali elementi sono più sollecitati a livello di tensione durante i diversi modi di vibrare. È visibile immediatamente come per i primi modi di vibrare 1-2 3-4 5-6 le zone interessate siano composte dagli elementi vicino l'albero con una crescita progressiva man mano che aumentano le frequenze naturali.

Nei modi di vibrare 7-8 invece è possibile notare come altri elementi dell'elica oltre a quelli nelle zone vicino l'albero siano interessati da uno stato di tensione non nullo, fino ad arrivare al caso 9-10 in cui la maggior parte degli elementi dell'elica, soprattutto nelle zone centrali del profilo alare siano quelle più interessate dallo stato di tensione, anche in maniera maggiore rispetto alla zona di collegamento con l'albero.

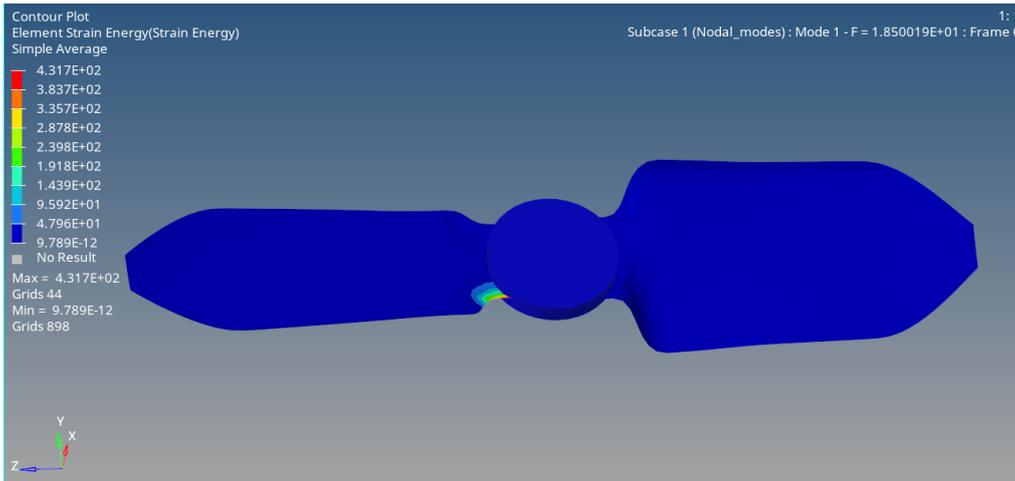


Figura 71: Element Strain Energy 1

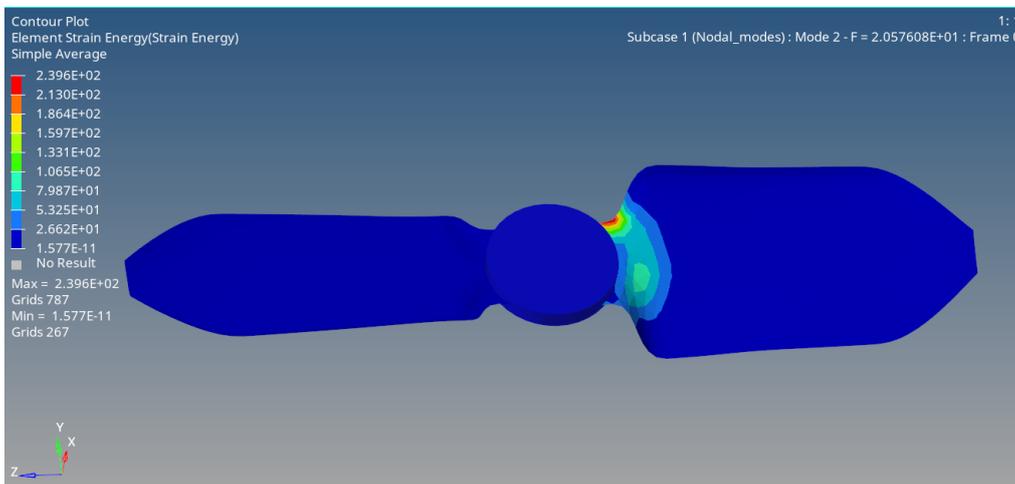


Figura 72: Element Strain Energy 2

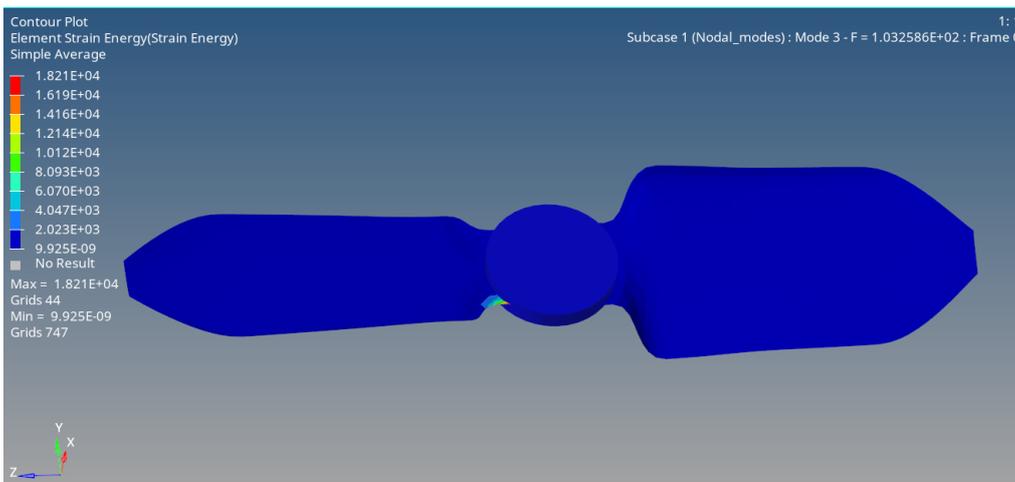


Figura 73: Element Strain Energy 3

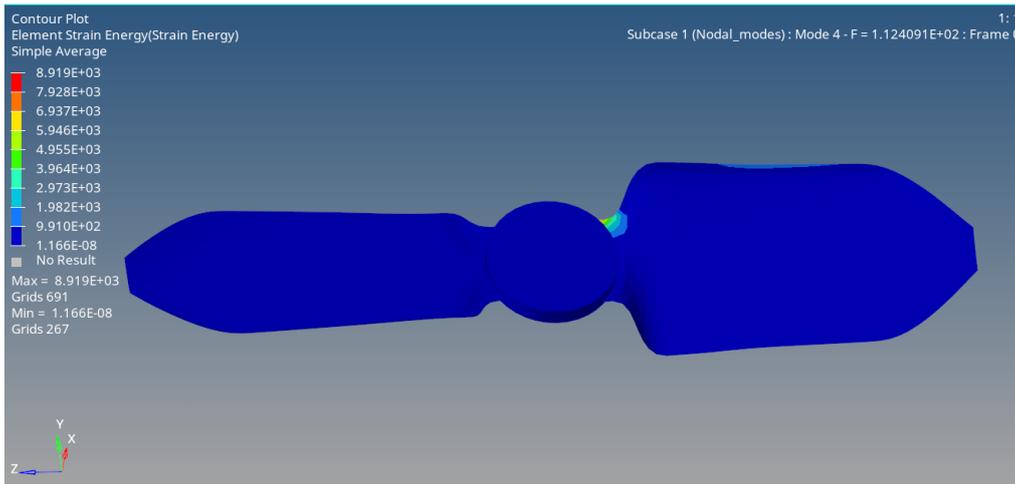


Figura 74: Element Strain Energy 4

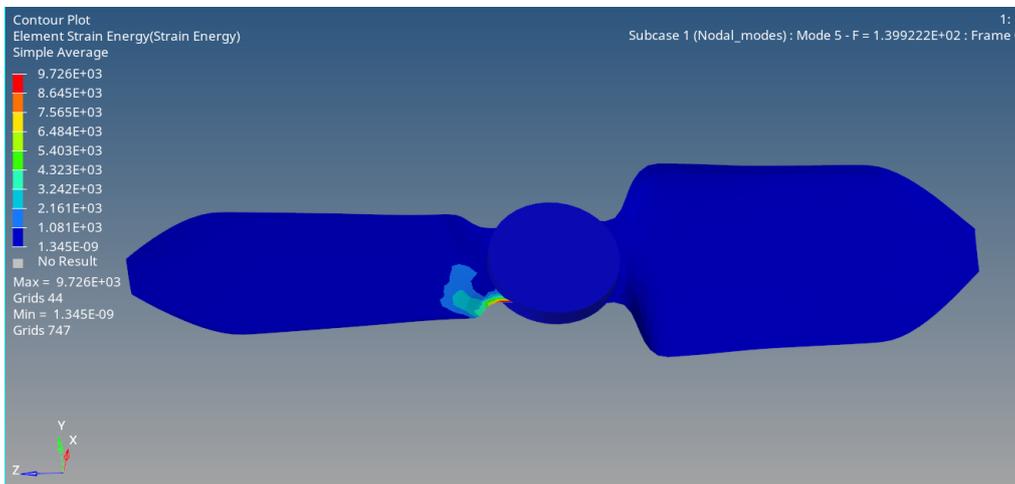


Figura 75: Element Strain Energy 5

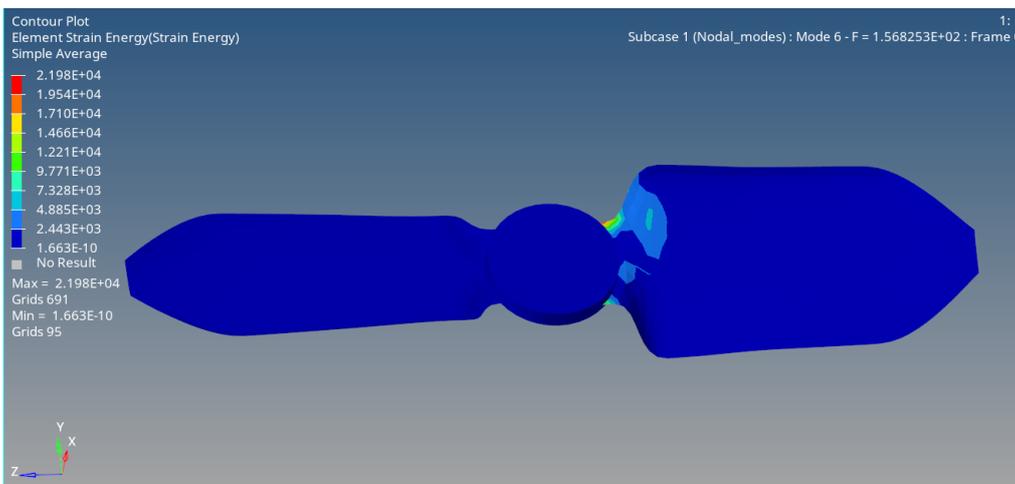


Figura 76: Element Strain Energy 6

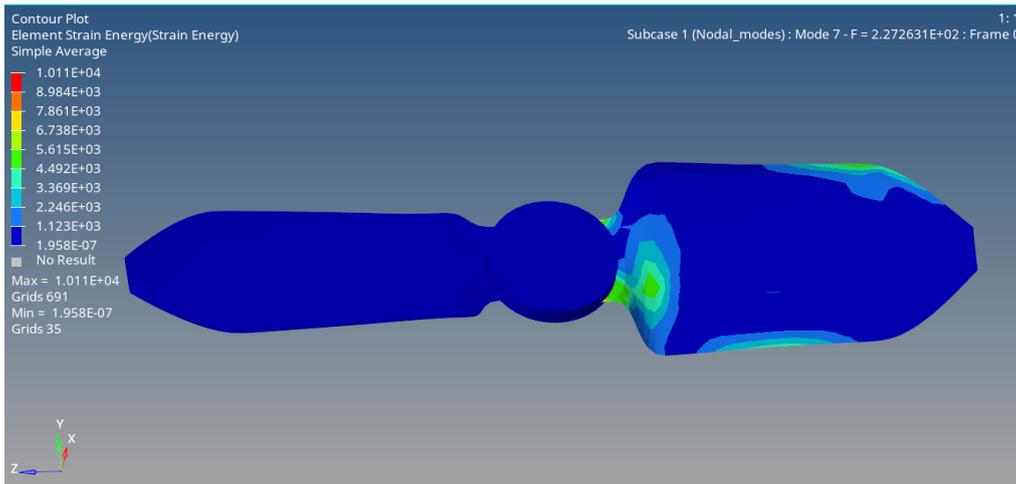


Figura 77: Element Strain Energy 7

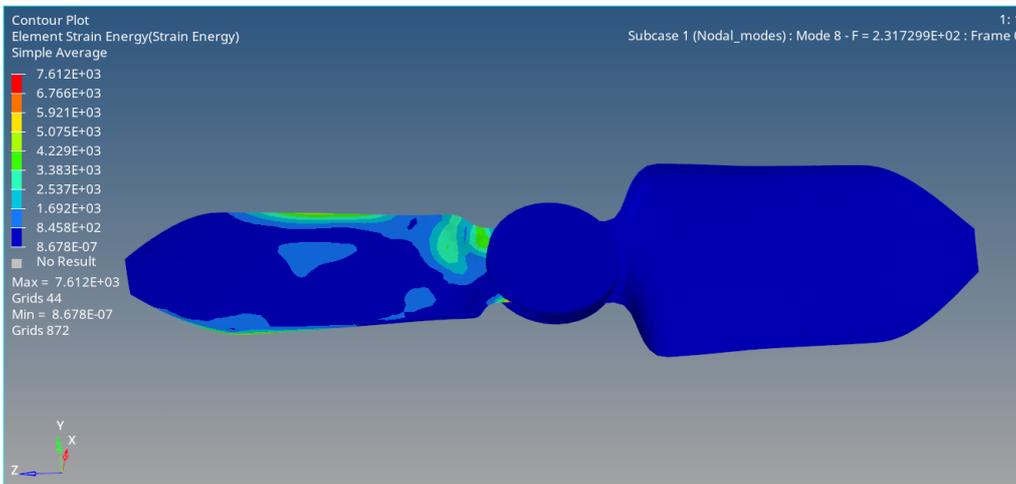


Figura 78: Element Strain Energy 8

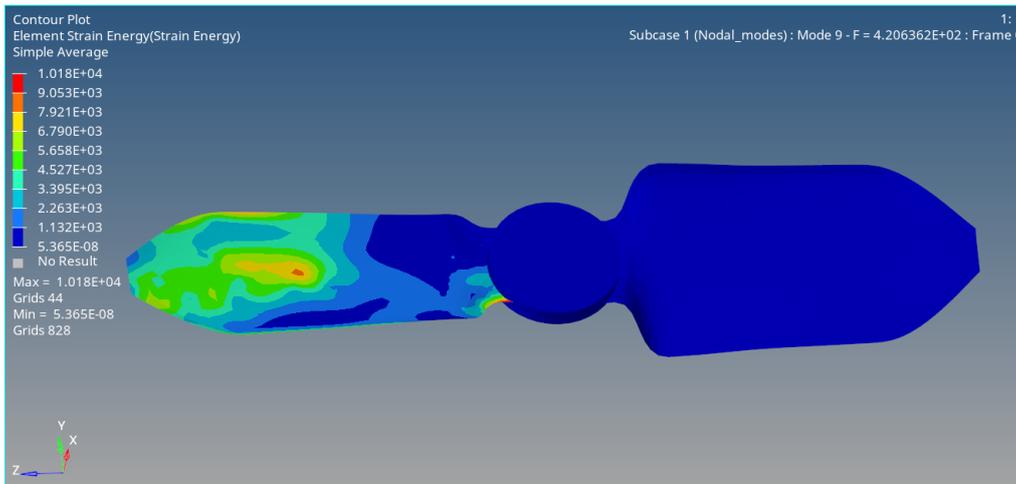


Figura 79: Element Strain Energy 9

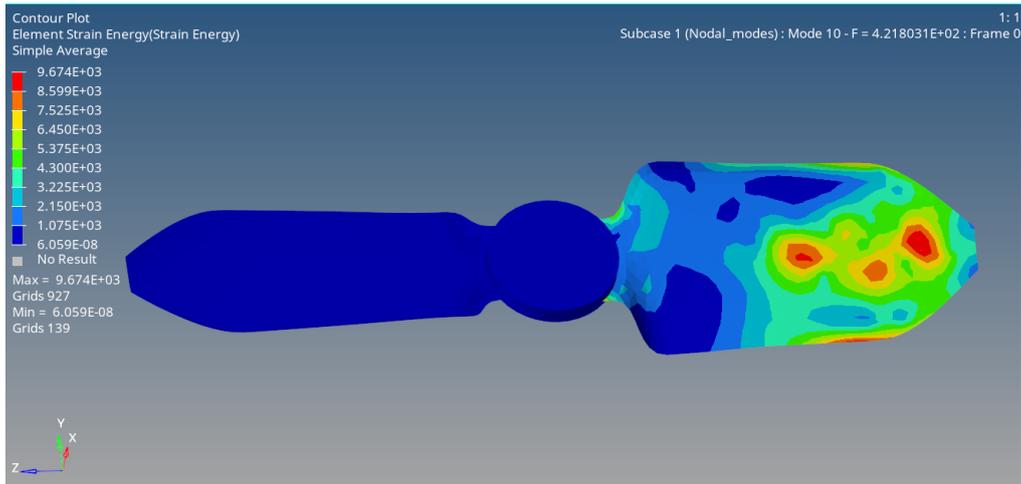


Figura 80: Element Strain Energy 10

9 Risultati Analisi Lineare

9.1 Spostamenti

9.1.1 Spostamenti con mesh da 5 mm

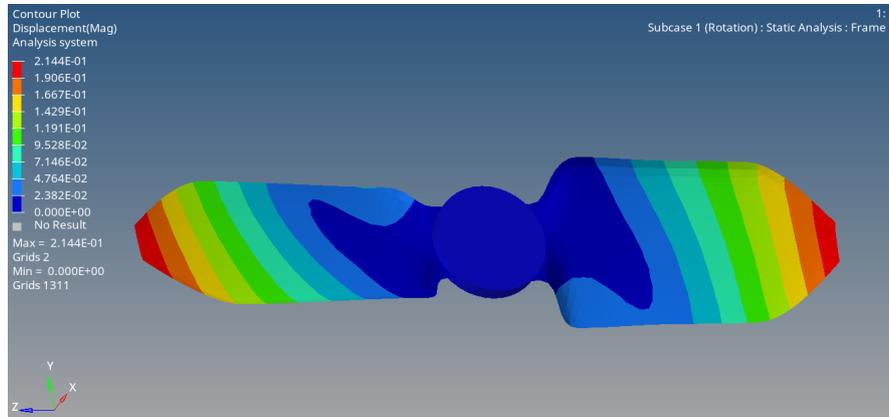


Figura 81: Spostamenti con spessore 1mm

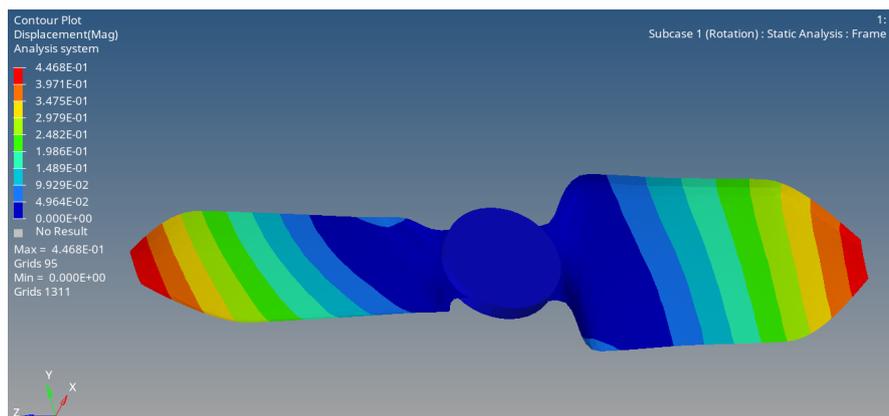


Figura 82: Spostamenti con spessore 0.7mm

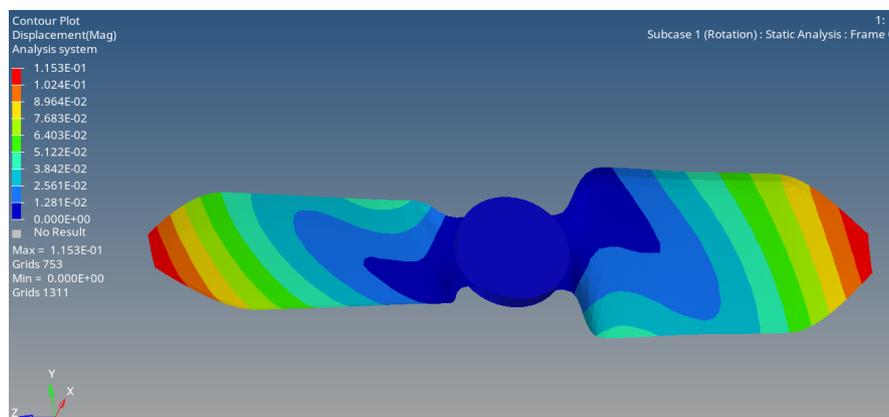


Figura 83: Spostamenti con spessore 1.3mm

9.1.2 Spostamenti con mesh da 2 mm

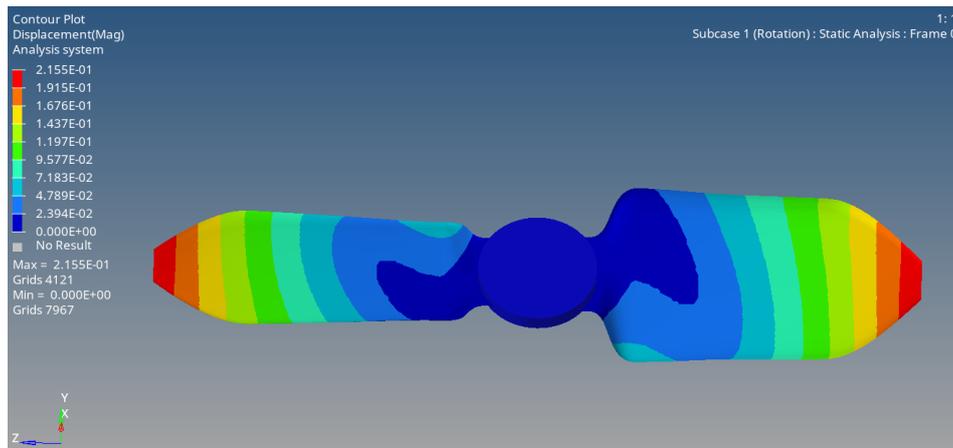


Figura 84: Spostamenti con spessore 1mm

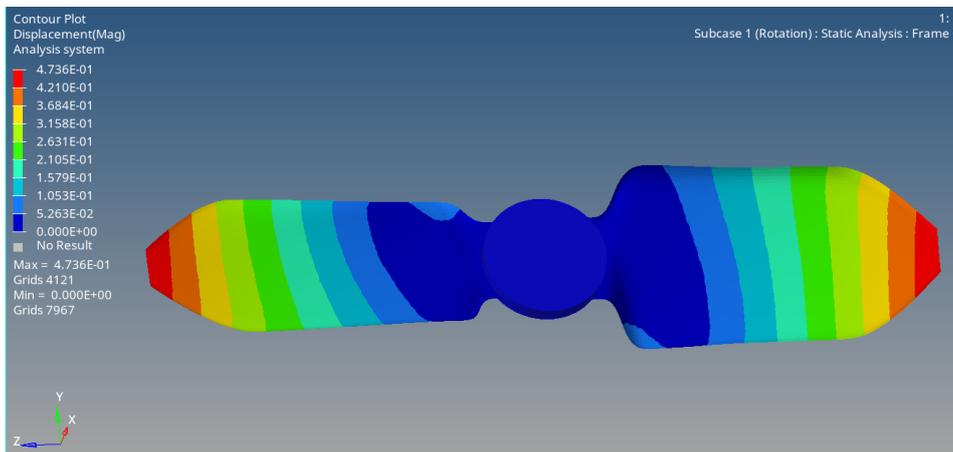


Figura 85: Spostamenti con spessore 0.7mm

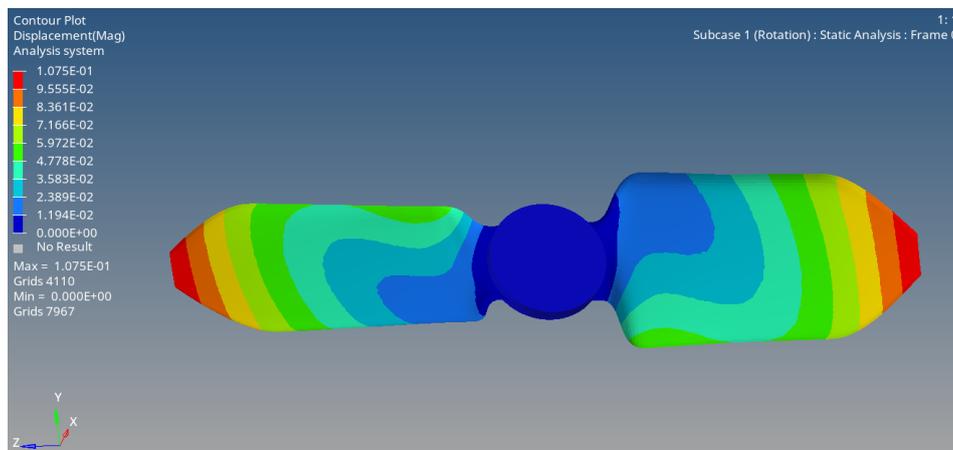


Figura 86: Spostamenti con spessore 1.3mm

9.1.3 Spostamenti con mesh da 1 mm

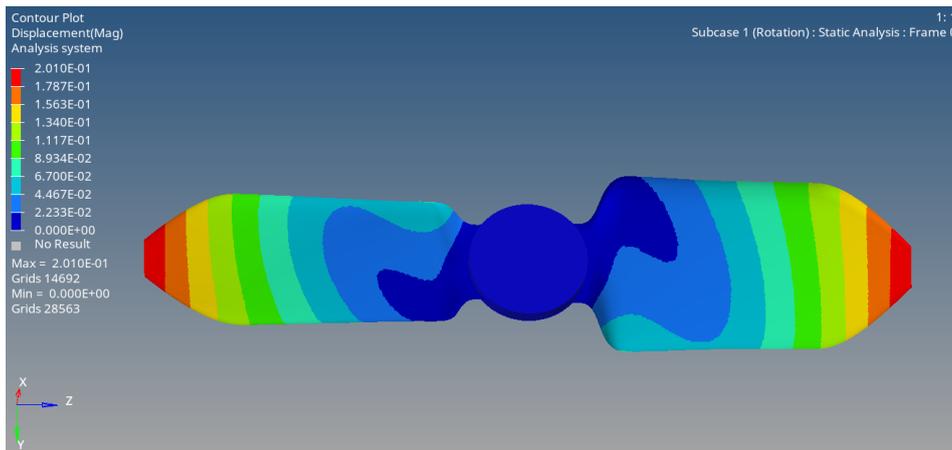


Figura 87: Spostamenti con spessore 1mm

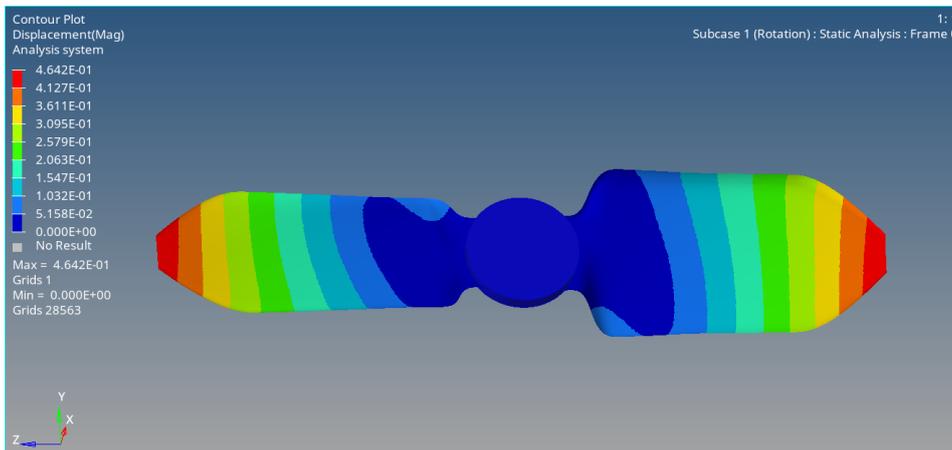


Figura 88: Spostamenti con spessore 0.7mm

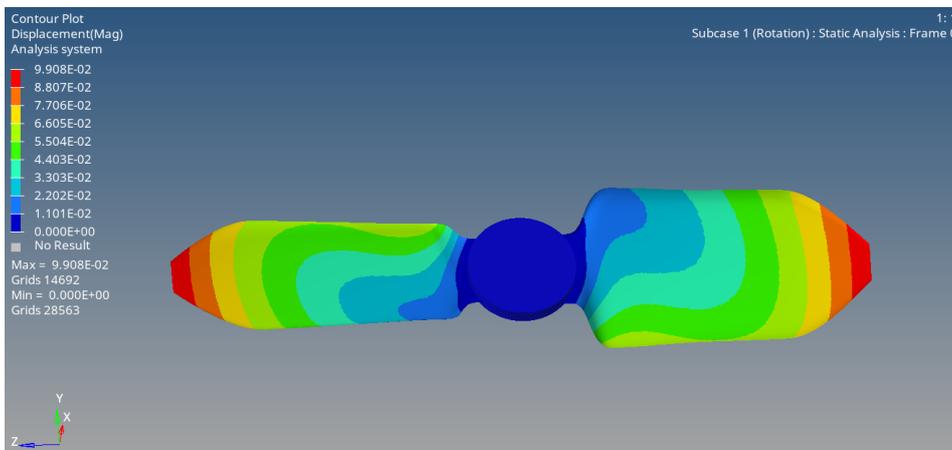


Figura 89: Spostamenti con spessore 1.3mm

Come effettuato per l'analisi modale è pratico utilizzare delle tabelle per visualizzare i risultati che il software ha presentato graficamente. Considerando le limitazioni imposte dalla versione Studenti di Hyperworks, che non permette l'utilizzo delle funzioni Math e Graph, è stato ritenuto utile impostare una tabella con i range degli spostamenti divisi per mesh e per spessori dell'elica. Di seguito le tabelle con i risultati dell'analisi lineare divisi in primis per dimensione di mesh (5mm, 2mm e 1mm) e in seconda battuta i risultati sono stati raccolti per i diversi spessori dell'elica (07mm, 10mm e 13mm) in modo da poter valutare l'impatto diretto di un aumento o riduzione dello spessore sugli spostamenti

Range	s=10mm [mm]	s=07mm [mm]	s=13mm [mm]
Max	0.2144	0.4468	0.1153
	0.1906	0.3971	0.1024
	0.1667	0.3475	0.08964
	0.1429	0.2979	0.07683
	0.1191	0.2482	0.06403
	0.09528	0.1986	0.05122
	0.07146	0.1489	0.03842
	0.04764	0.09929	0.02561
	0.02382	0.04964	0.01281
Min	0	0	0

Tabella 18: Risultati analisi lineare - Spostamenti con spessore 0.7mm - 1mm - 1.3mm con mesh da 5mm

Range	s=10mm [mm]	s=07mm [mm]	s=13mm [mm]
Max	0.2155	0.4736	0.1075
	0.1915	0.421	0.09555
	0.1676	0.3684	0.08361
	0.1437	0.3158	0.07166
	0.1197	0.2631	0.05972
	0.09577	0.2105	0.04778
	0.07183	0.1579	0.03583
	0.04789	0.1053	0.02389
	0.02394	0.05263	0.01194
Min	0	0	0

Tabella 19: Risultati analisi lineare - Spostamenti con spessore 0.7mm - 1mm - 1.3mm con mesh da 2mm

Range	s=10mm [mm]	s=07mm [mm]	s=13mm [mm]
Max	0.201	0.4642	0.09908
	0.1787	0.4127	0.08807
	0.1563	0.3611	0.07706
	0.134	0.3095	0.06605
	0.1117	0.2579	0.05504
	0.08934	0.2063	0.04403
	0.067	0.1547	0.03303
	0.04467	0.1032	0.02202
	0.02233	0.05158	0.01101
Min	0	0	0

Tabella 20: Risultati analisi lineare - Spostamenti con spessore 0.7mm - 1mm - 1.3mm con mesh da 1mm

Range	[Mesh 5mm] [mm]	[Mesh 2mm] [mm]	[Mesh 1mm] [mm]
Max	0.2144	0.2155	0.201
	0.1906	0.1915	0.1787
	0.1667	0.1676	0.1563
	0.1429	0.1437	0.134
	0.1191	0.1197	0.1117
	0.09528	0.09577	0.08934
	0.07146	0.07183	0.067
	0.04764	0.04789	0.04467
	0.02382	0.02394	0.02233
Min	0	0	0

Tabella 21: Risultati analisi lineare - Spostamenti con spessore 10mm con mesh da 5mm, 2mm e 1mm

Range	[Mesh 5mm] [mm]	[Mesh 2mm] [mm]	[Mesh 1mm] [mm]
Max	0.4468	0.4736	0.4642
	0.3971	0.421	0.4127
	0.3475	0.3684	0.3611
	0.2979	0.3158	0.3095
	0.2482	0.2631	0.2579
	0.1986	0.2105	0.2063
	0.1489	0.1579	0.1547
	0.09929	0.1053	0.1032
	0.04964	0.05263	0.05158
Min	0	0	0

Tabella 22: Risultati analisi lineare - Spostamenti con spessore 0.7mm con mesh da 5mm, 2mm e 1mm

Range	[Mesh 5mm] [mm]	[Mesh 2mm] [mm]	[Mesh 1mm] [mm]
Max	0.1153	0.1075	0.09908
	0.1024	0.09555	0.08807
	0.08964	0.08361	0.07706
	0.07683	0.07166	0.06605
	0.06403	0.05972	0.05504
	0.05122	0.04778	0.04403
	0.03842	0.03583	0.03303
	0.02561	0.02389	0.02202
	0.01281	0.01194	0.01101
Min	0	0	0

Tabella 23: Risultati analisi lineare - Spostamenti con spessore 13mm con mesh da 5mm, 2mm e 1mm

9.2 Deformazioni

9.2.1 Deformazioni con mesh da 5 mm

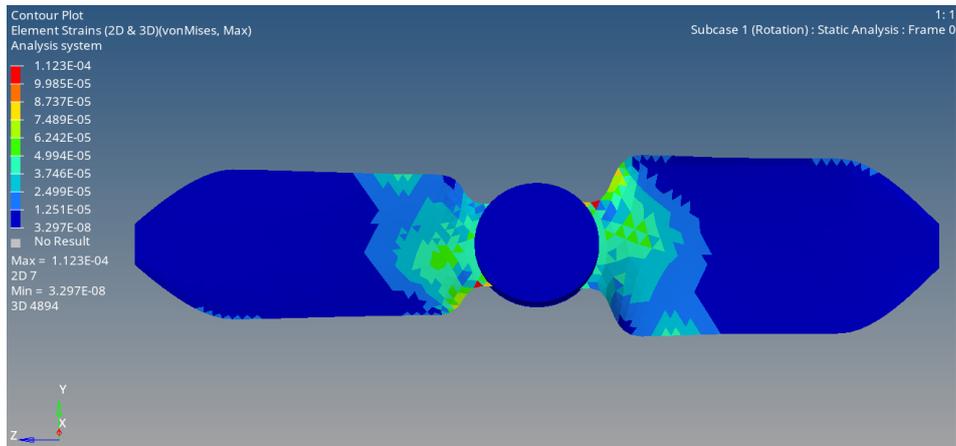


Figura 90: Deformazioni con spessore 1mm senza averaging

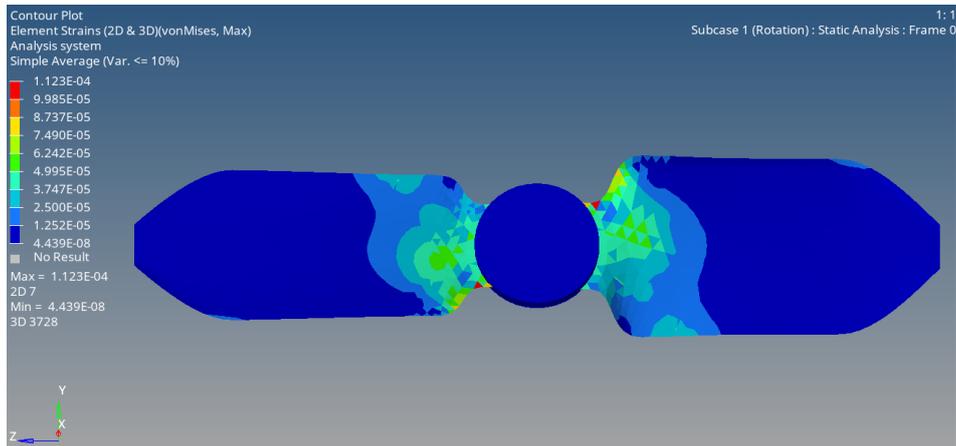


Figura 91: Deformazioni con spessore 1mm con simple averaging

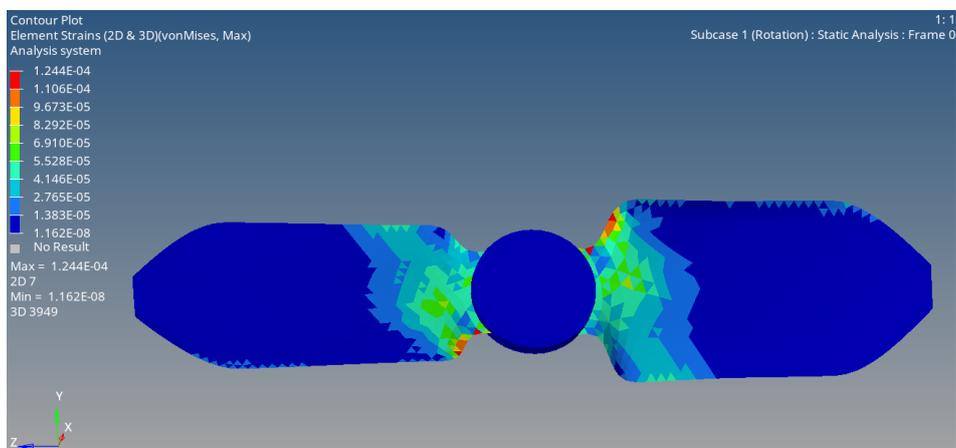


Figura 92: Deformazioni con spessore 0.7mm senza averaging

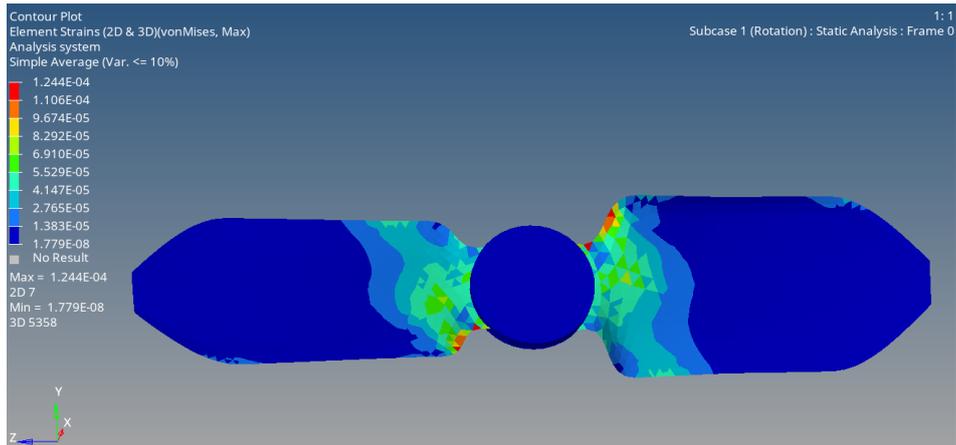


Figura 93: Deformazioni con spessore 0.7mm con simple averaging

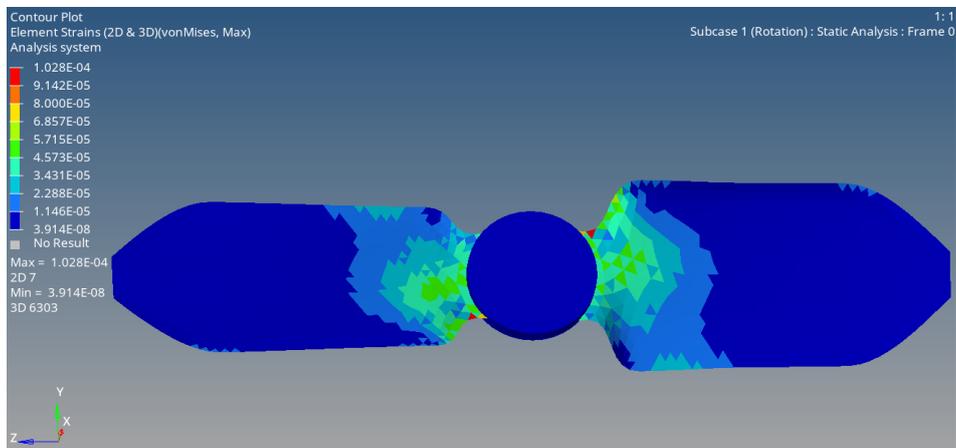


Figura 94: Deformazioni con spessore 13mm senza averaging

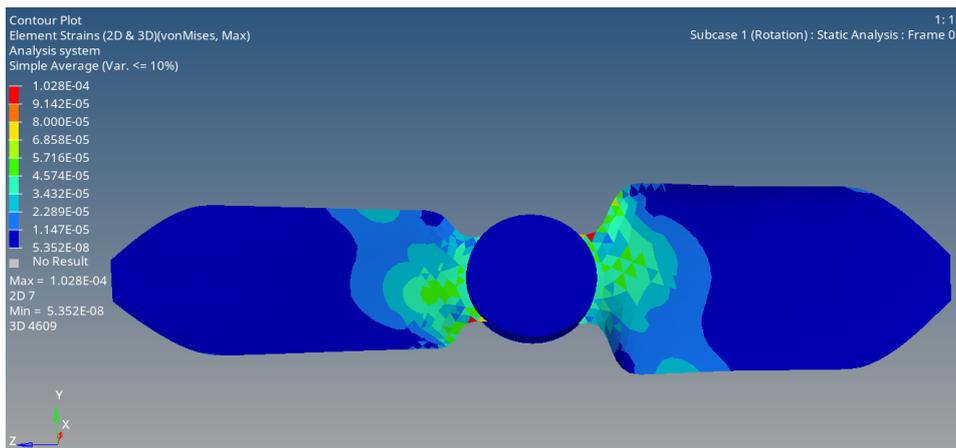


Figura 95: Deformazioni con spessore 13mm con simple averaging

9.2.2 Deformazioni con mesh da 2 mm

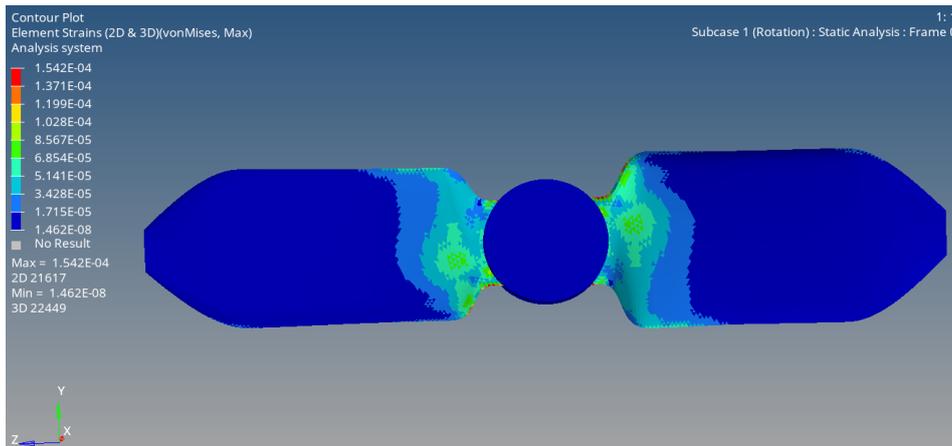


Figura 96: Deformazioni con spessore 1mm senza averaging

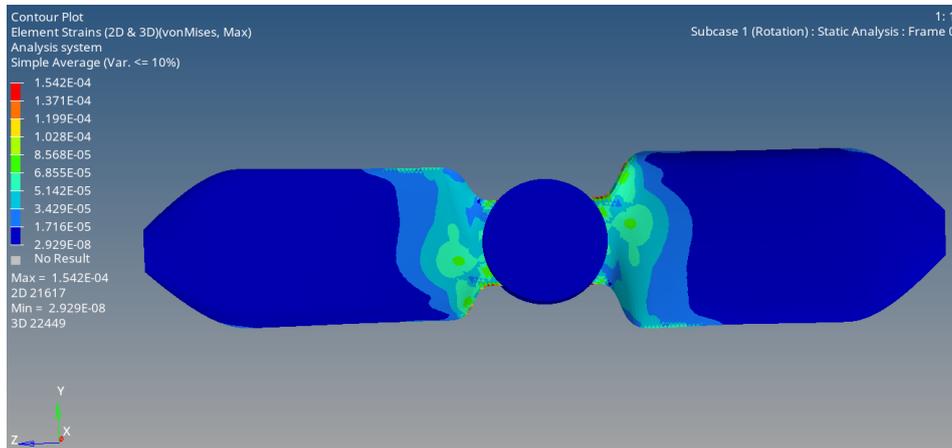


Figura 97: Deformazioni con spessore 1mm con simple averaging

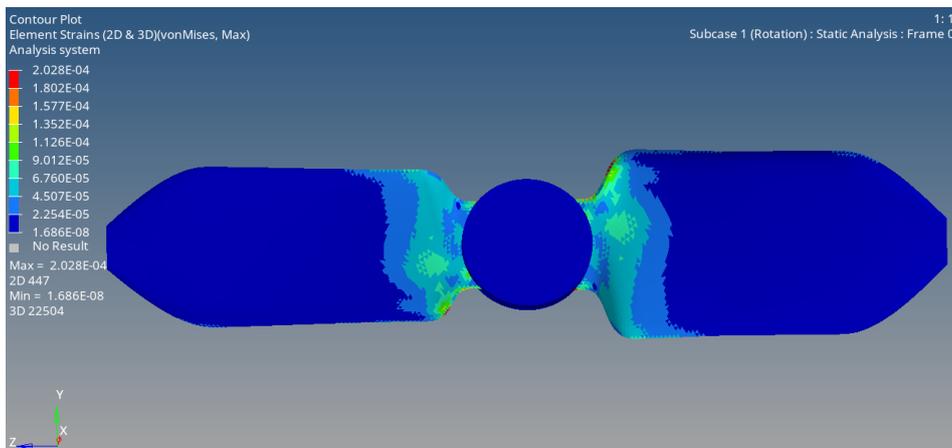


Figura 98: Deformazioni con spessore 0.7mm senza averaging

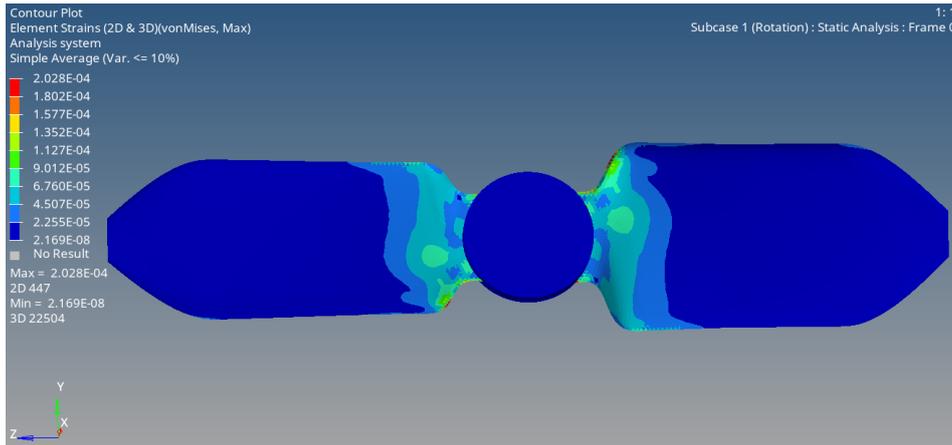


Figura 99: Deformazioni con spessore 0.7mm con simple averaging

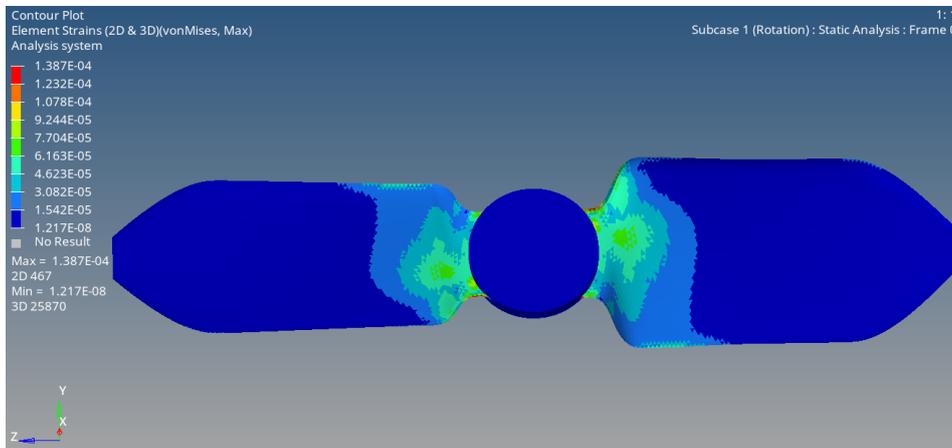


Figura 100: Deformazioni con spessore 13mm senza averaging

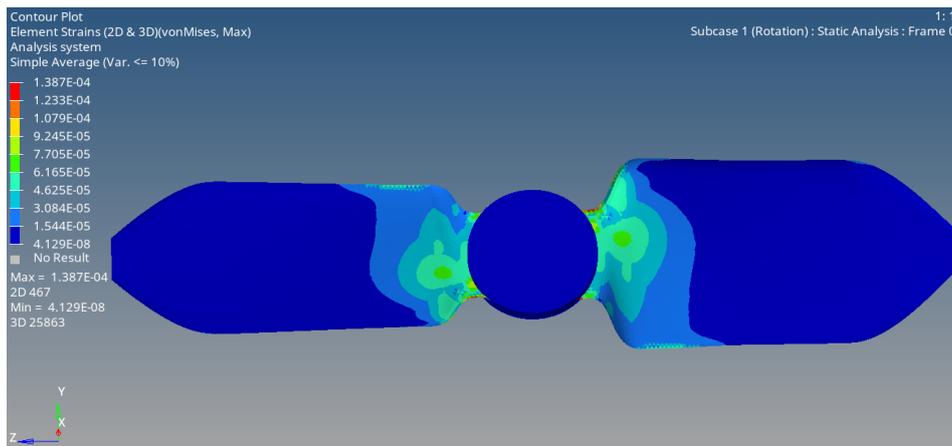


Figura 101: Deformazioni con spessore 13mm con simple averaging

9.2.3 Deformazioni con mesh da 1 mm

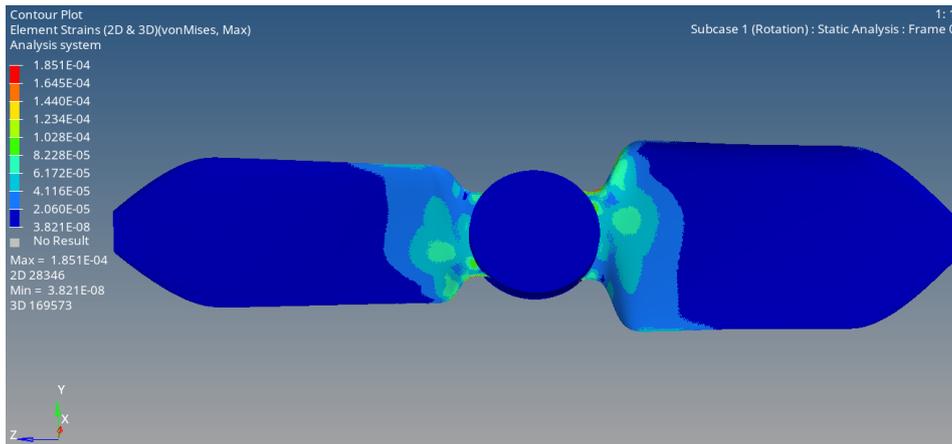


Figura 102: Deformazioni con spessore 1mm senza averaging

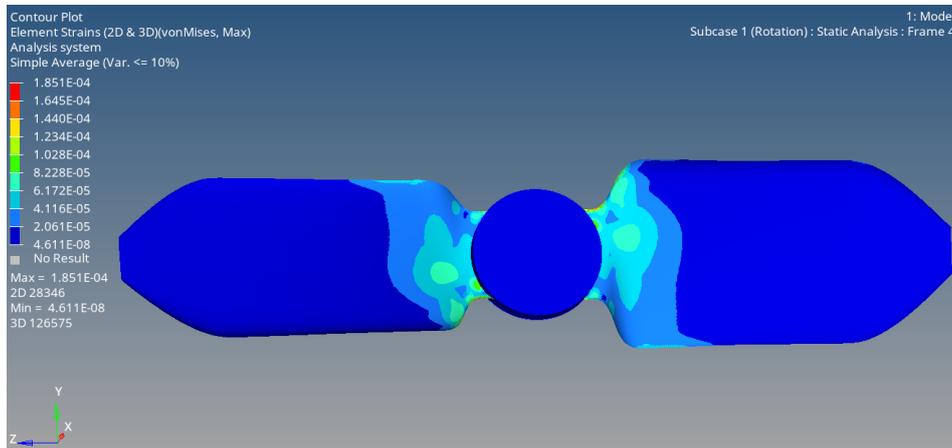


Figura 103: Deformazioni con spessore 1mm con simple averaging

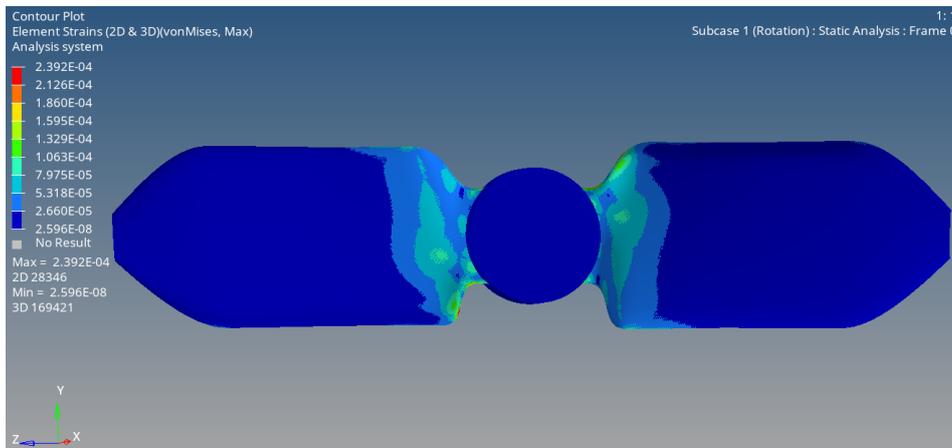


Figura 104: Deformazioni con spessore 0.7mm senza averaging

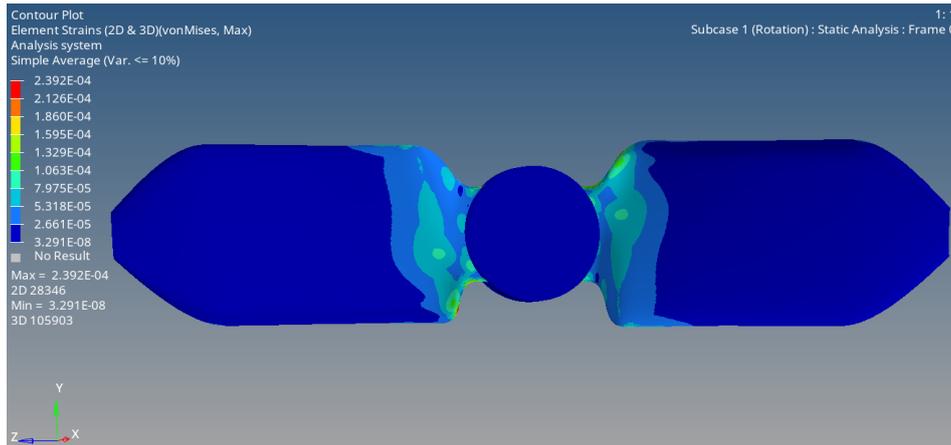


Figura 105: Deformazioni con spessore 0.7mm con simple averaging

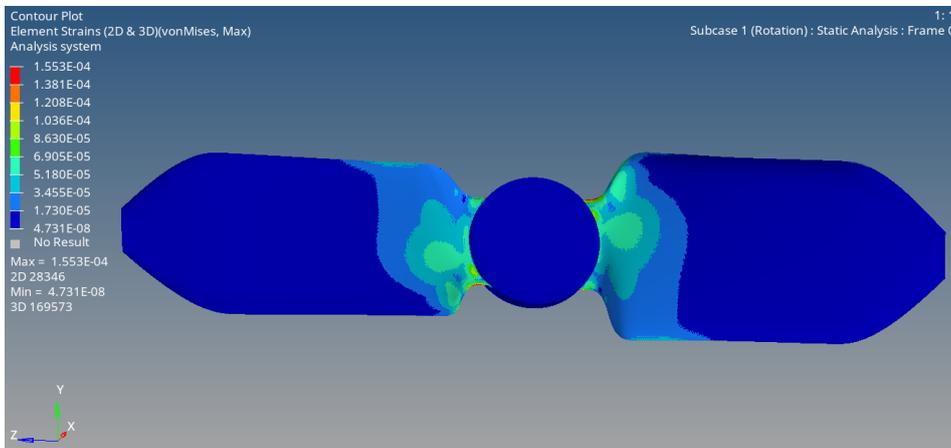


Figura 106: Deformazioni con spessore 13mm senza averaging

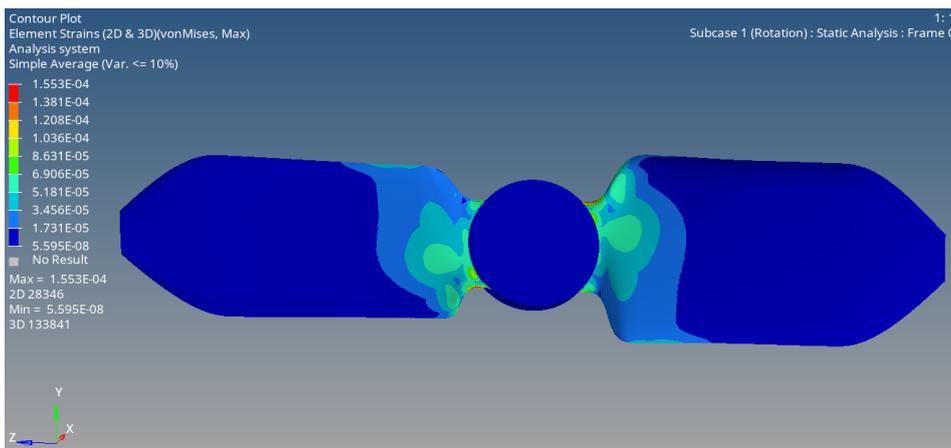


Figura 107: Deformazioni con spessore 13mm con simple averaging

Range	s=10mm [mm]	s=07mm [mm]	s=13mm [mm]
Max	0.0001123	0.0001244	0.0001028
	0.00009985	0.0001106	0.0001106
	0.00008737	0.00009673	0.00008
	0.00007489	0.00008292	0.00006858
	0.00006242	0.0000691	0.00005716
	0.00004994	0.00005528	0.00004574
	0.00003746	0.00004146	0.00003432
	0.00002499	0.00002765	0.00002289
	0.00001251	0.00001383	0.00001147
Min	0.00000003297	0.00000001162	0.00000005352

Tabella 24: Risultati analisi lineare - Deformazioni con spessore 0.7mm - 1mm - 1.3mm con mesh da 5mm

Range	s=10mm [mm]	s=07mm [mm]	s=13mm [mm]
Max	0.0001542	0.0002028	0.0001387
	0.0001371	0.0001802	0.0001233
	0.0001199	0.0001577	0.0001079
	0.0001028	0.0001352	0.00009245
	0.00008568	0.0001127	0.00007705
	0.00006855	0.00009012	0.00006165
	0.00005142	0.0000676	0.00004625
	0.00003429	0.00004507	0.00003084
	0.00001716	0.00002255	0.00001544
Min	0.00000002929	0.00000002169	0.00000004129

Tabella 25: Risultati analisi lineare - Deformazioni con spessore 0.7mm - 1mm - 1.3mm con mesh da 2mm

Range	s=10mm [mm]	s=07mm [mm]	s=13mm [mm]
Max	0.0001851	0.0002392	0.0001553
	0.0001645	0.0002126	0.0001381
	0.000144	0.000186	0.0001208
	0.0001234	0.0001595	0.0001036
	0.0001028	0.0001329	0.00008631
	0.00008228	0.0001063	0.00006906
	0.00006172	0.00007975	0.00005181
	0.00004116	0.00005318	0.00003456
	0.00002061	0.00002061	0.00001731
Min	0.00000004611	0.00000003291	0.00000005595

Tabella 26: Risultati analisi lineare - Deformazioni con spessore 0.7mm - 1mm - 1.3mm con mesh da 1mm

Range	[Mesh 5mm] [mm]	[Mesh 2mm] [mm]	[Mesh 1mm] [mm]
Max	0.0001123	0.0001542	0.0001851
	0.00009985	0.0001371	0.0001645
	0.00008737	0.0001199	0.000144
	0.00007489	0.0001028	0.0001234
	0.00006242	0.00008568	0.0001028
	0.00004994	0.00006855	0.00008228
	0.00003746	0.00005142	0.00006172
	0.00002499	0.00003429	0.00004116
	0.00001251	0.00001716	0.00002061
Min	0.00000003297	0.00000002929	0.00000004611

Tabella 27: Risultati analisi lineare - Deformazioni con spessore 10mm con mesh da 5mm, 2mm e 1mm

Range	[Mesh 5mm] [mm]	[Mesh 2mm] [mm]	[Mesh 1mm] [mm]
Max	0.0001244	0.0002028	0.0002392
	0.0001106	0.0001802	0.0002126
	0.00009673	0.0001577	0.000186
	0.00008292	0.0001352	0.0001595
	0.0000691	0.0001127	0.0001329
	0.00005528	0.00009012	0.0001063
	0.00004146	0.0000676	0.00007975
	0.00002765	0.00004507	0.00005318
	0.00001383	0.00002255	0.00002061
Min	0.00000001162	0.00000002169	0.00000003291

Tabella 28: Risultati analisi lineare - Deformazioni con spessore 0.7mm con mesh da 5mm, 2mm e 1mm

Range	[Mesh 5mm] [mm]	[Mesh 2mm] [mm]	[Mesh 1mm] [mm]
Max	0.0001028	0.0001387	0.0001553
	0.0001106	0.0001233	0.0001381
	0.00008	0.0001079	0.0001208
	0.00006858	0.00009245	0.0001036
	0.00005716	0.00007705	0.00008631
	0.00004574	0.00006165	0.00006906
	0.00003432	0.00004625	0.00005181
	0.00002289	0.00003084	0.00003456
	0.00001147	0.00001544	0.00001731
Min	0.00000005352	0.00000004129	0.00000005595

Tabella 29: Risultati analisi lineare - Deformazioni con spessore 13mm con mesh da 5mm, 2mm e 1mm

9.3 Tensioni

9.3.1 Tensioni con mesh da 5 mm

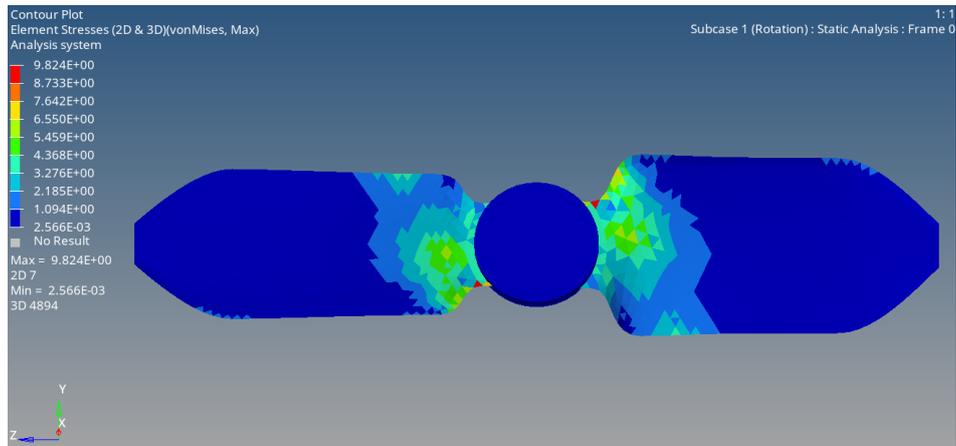


Figura 108: Tensioni con spessore 1mm senza averaging

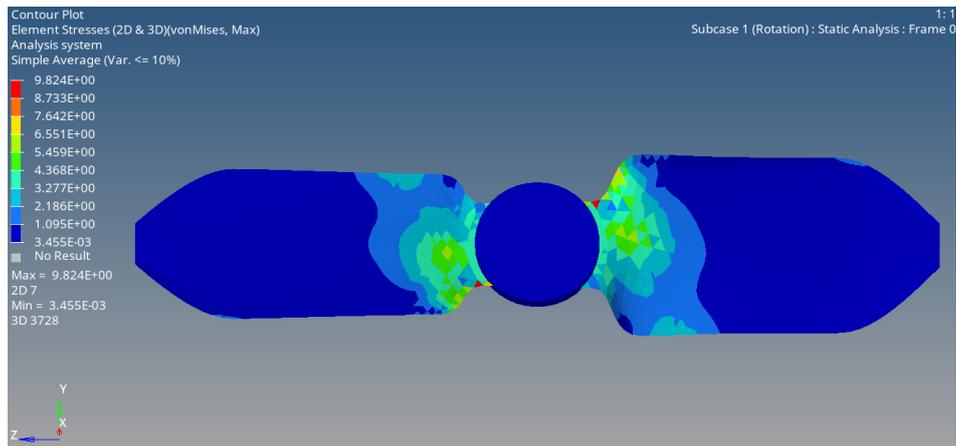


Figura 109: Tensioni con spessore 1mm con simple averaging

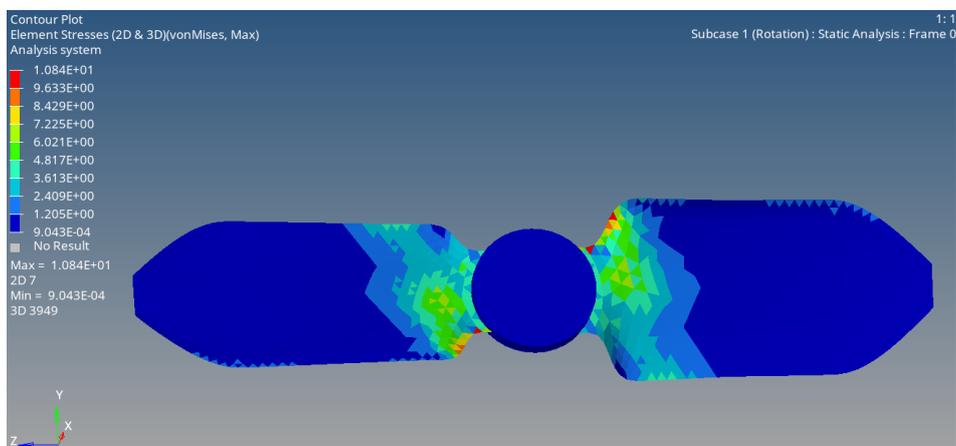


Figura 110: Tensioni con spessore 0.7mm senza averaging

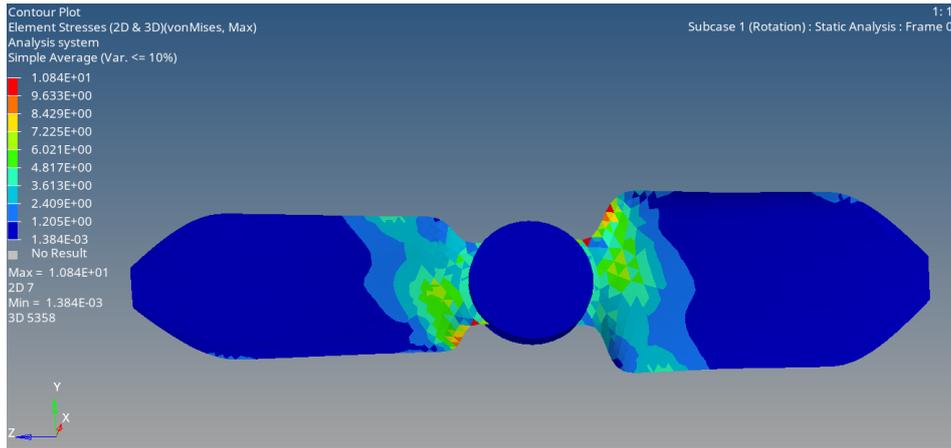


Figura 111: Tensioni con spessore 0.7mm con simple averaging

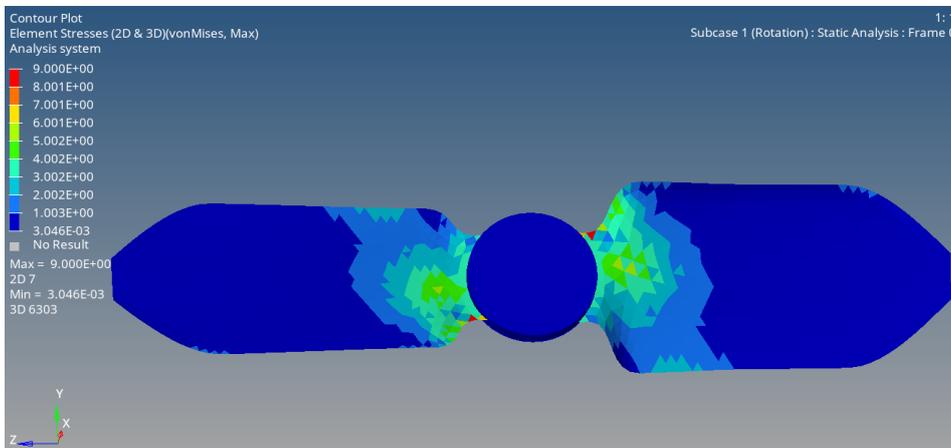


Figura 112: Tensioni con spessore 13mm senza averaging

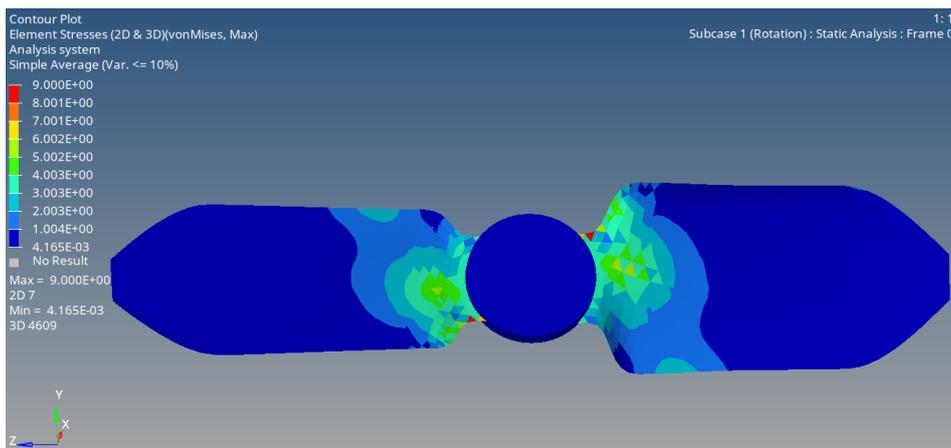


Figura 113: Tensioni con spessore 13mm con simple averaging

9.3.2 Tensioni con mesh da 2 mm

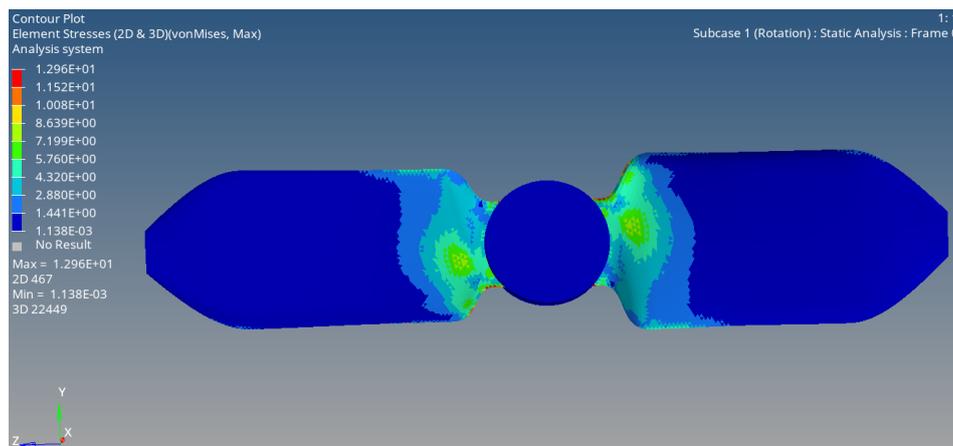


Figura 114: Tensioni con spessore 1mm senza averaging

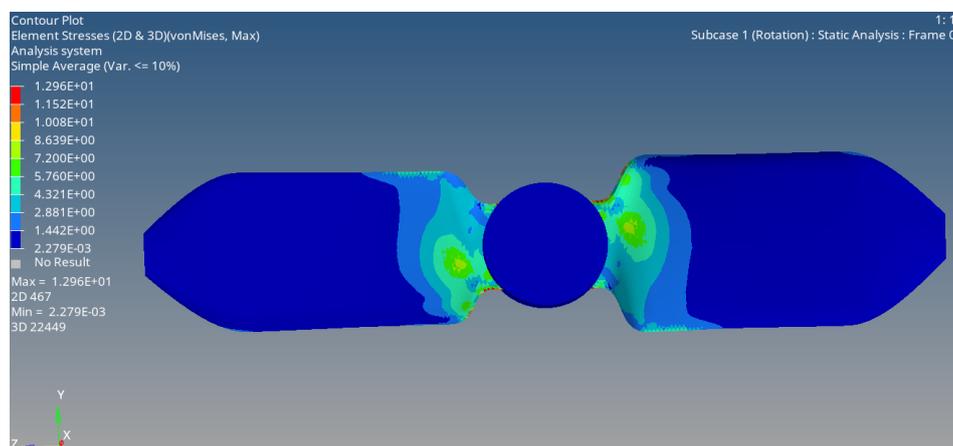


Figura 115: Tensioni con spessore 1mm con simple averaging

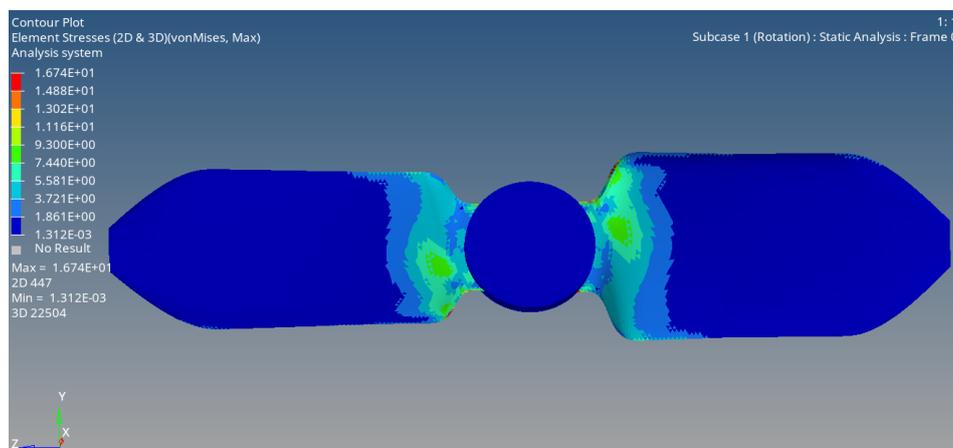


Figura 116: Tensioni con spessore 0.7mm senza averaging

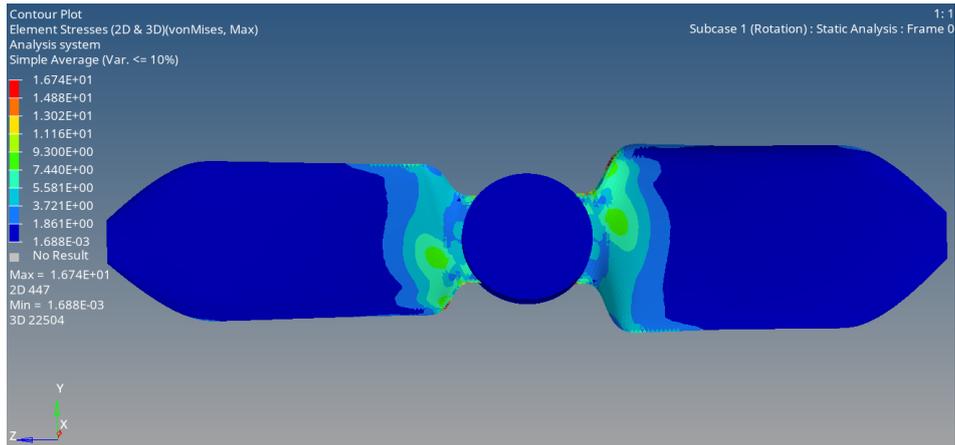


Figura 117: Tensioni con spessore 0.7mm con simple averaging

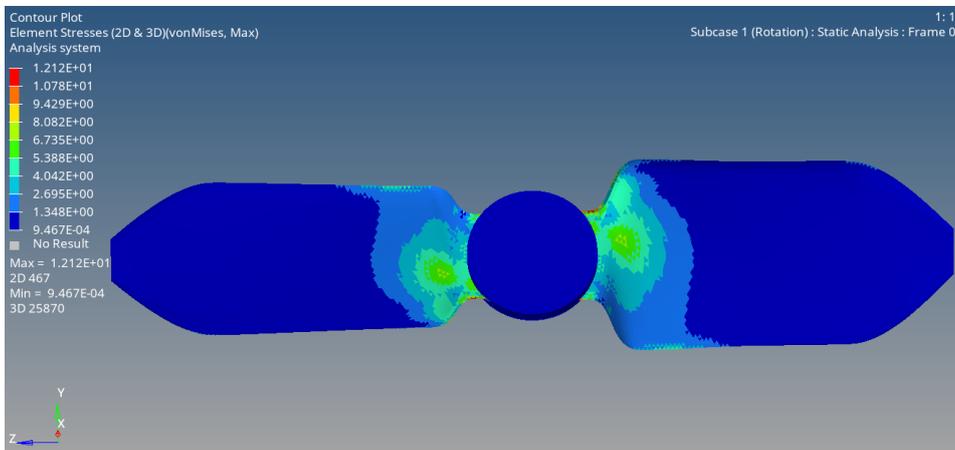


Figura 118: Tensioni con spessore 13mm senza averaging

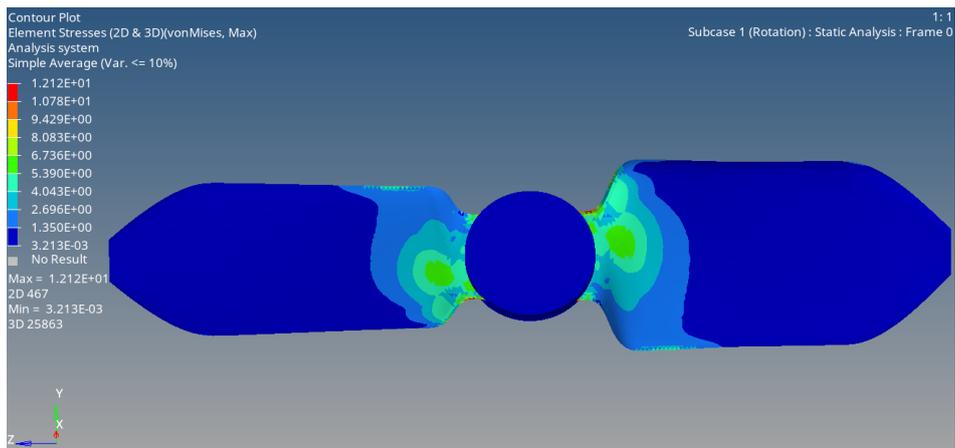


Figura 119: Tensioni con spessore 13mm con simple averaging

9.3.3 Tensioni con mesh da 1 mm

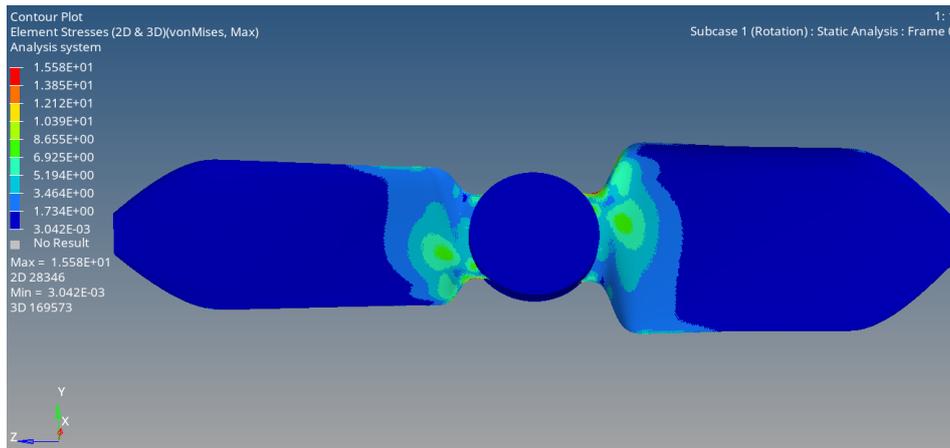


Figura 120: Tensioni con spessore 1mm senza averaging

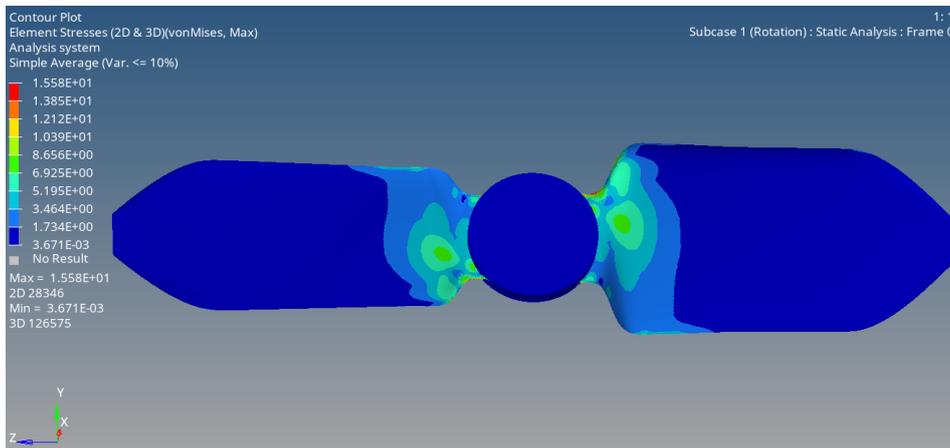


Figura 121: Tensioni con spessore 1mm con simple averaging

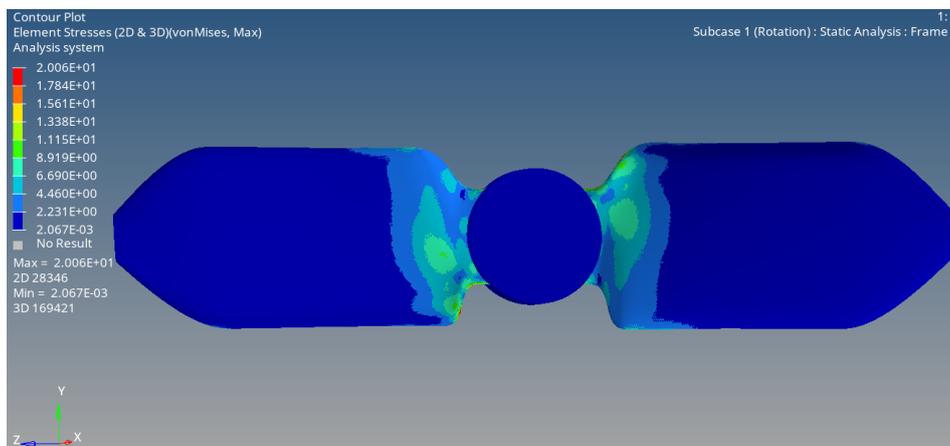


Figura 122: Tensioni con spessore 0.7mm senza averaging

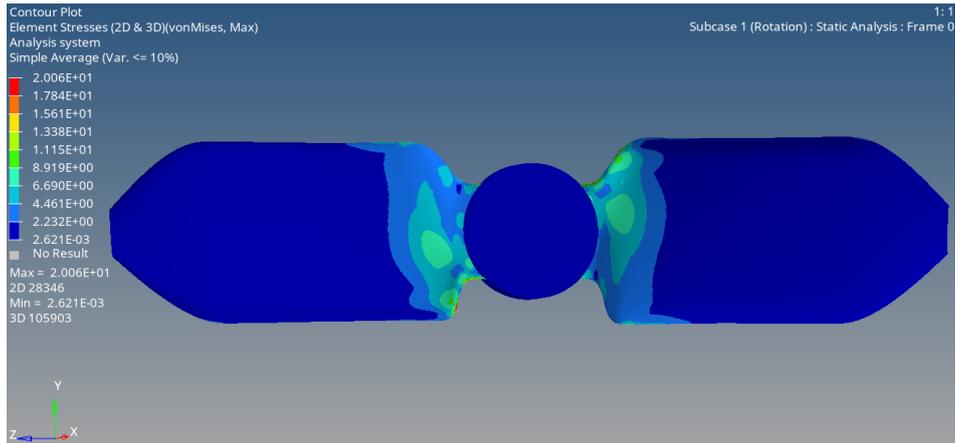


Figura 123: Tensioni con spessore 0.7mm con simple averaging

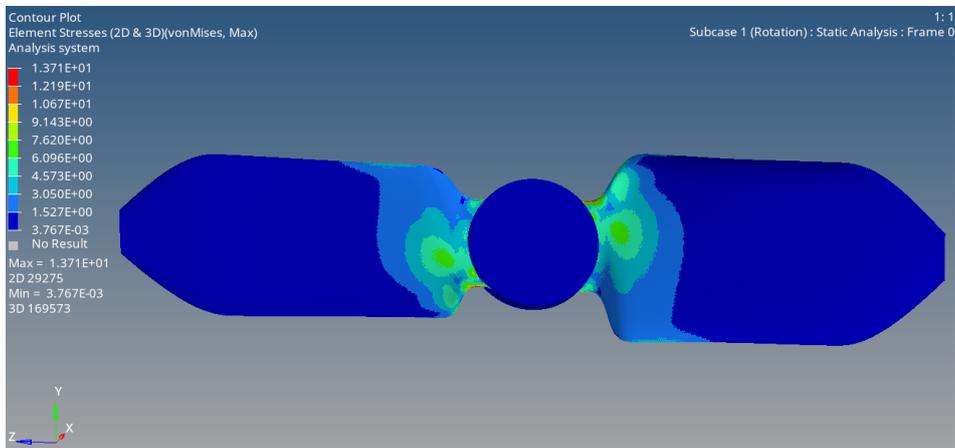


Figura 124: Tensioni con spessore 13mm senza averaging

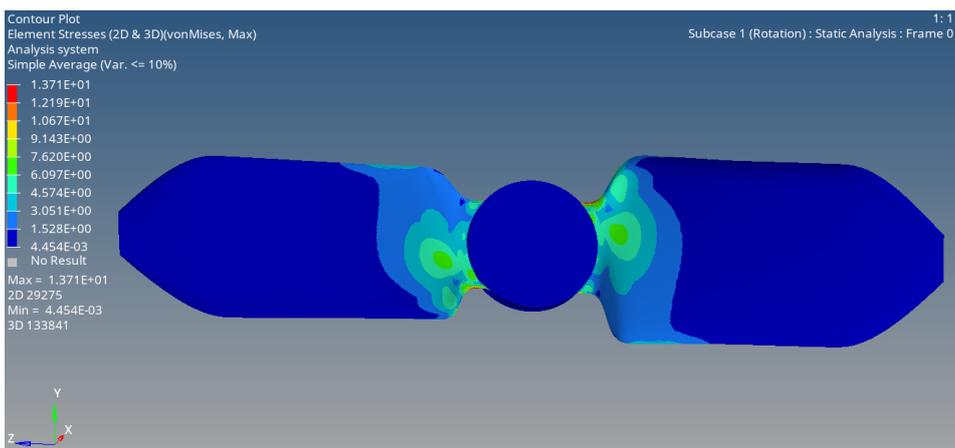


Figura 125: Tensioni con spessore 13mm con simple averaging

Range	s=10mm [N/mm ²]	s=07mm [N/mm ²]	s=13mm [N/mm ²]
Max	9.824	10.84	9
	8.733	9.633	8.001
	7.642	8.429	7.001
	6.551	7.225	6.002
	5.459	6.021	5.002
	4.368	4.817	4.003
	3.277	3.613	3.003
	2.186	2.409	2.003
	1.095	1.205	1.004
Min	0.003455	0.001384	0.004165

Tabella 30: Risultati analisi lineare - Tensioni con spessore 0.7mm - 1mm - 1.3mm con mesh da 5mm

Range	s=10mm [N/mm ²]	s=07mm [N/mm ²]	s=13mm [N/mm ²]
Max	12.96	16.74	12.12
	11.52	14.88	10.78
	10.08	13.02	9.429
	8.639	11.16	8.083
	7.2	9.3	6.736
	5.76	7.44	5.39
	4.321	5.581	4.043
	2.881	3.721	2.696
	1.442	1.861	1.35
Min	0.002279	0.001688	0.003213

Tabella 31: Risultati analisi lineare - Tensioni con spessore 0.7mm - 1mm - 1.3mm con mesh da 2mm

Range	s=10mm [N/mm ²]	s=07mm [N/mm ²]	s=13mm [N/mm ²]
Max	15.58	20.06	13.71
	13.85	17.84	12.19
	12.12	15.61	10.67
	10.39	13.38	9.143
	8.656	11.15	7.62
	6.925	8.919	6.097
	5.195	6.69	4.574
	3.464	4.461	3.051
	1.734	2.232	1.528
Min	0.003671	0.002621	0.004454

Tabella 32: Risultati analisi lineare - Tensioni con spessore 0.7mm - 1mm - 1.3mm con mesh da 1mm

Range	[Mesh 5mm] [N/mm ²]	[Mesh 2mm] [N/mm ²]	[Mesh 1mm] [N/mm ²]
Max	9.824	12.96	15.58
	8.733	11.52	13.85
	7.642	10.08	12.12
	6.551	8.639	10.39
	5.459	7.2	8.656
	4.368	5.76	6.925
	3.277	4.321	5.195
	2.186	2.881	3.464
	1.095	1.442	1.734
Min	0.003455	0.002279	0.003671

Tabella 33: Risultati analisi lineare - Tensioni con spessore 10mm con mesh da 5mm, 2mm e 1mm

Range	[Mesh 5mm] [N/mm^2]	[Mesh 2mm] [N/mm^2]	[Mesh 1mm] [N/mm^2]
Max	10.84	16.74	20.06
	9.633	14.88	17.84
	8.429	13.02	15.61
	7.225	11.16	13.38
	6.021	9.3	11.15
	4.817	7.44	8.919
	3.613	5.581	6.69
	2.409	3.721	4.461
	1.205	1.861	2.232
Min	0.001384	0.001688	0.002621

Tabella 34: Risultati analisi lineare - Tensioni con spessore 0.7mm con mesh da 5mm, 2mm e 1mm

Range	[Mesh 5mm] [N/mm^2]	[Mesh 2mm] [N/mm^2]	[Mesh 1mm] [N/mm^2]
Max	9	12.12	13.71
	8.001	10.78	12.19
	7.001	9.429	10.67
	6.002	8.083	9.143
	5.002	6.736	7.62
	4.003	5.39	6.097
	3.003	4.043	4.574
	2.003	2.696	3.051
	1.004	1.35	1.528
Min	0.004165	0.003213	0.004454

Tabella 35: Risultati analisi lineare - Tensioni con spessore 13mm con mesh da 5mm, 2mm e 1mm

9.4 Ulteriori risultati in output

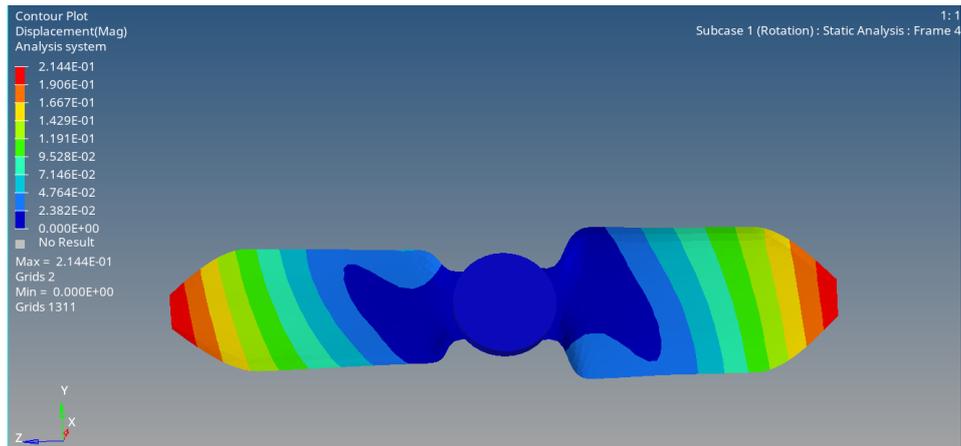


Figura 126: Spostamenti nel sistema magnitude

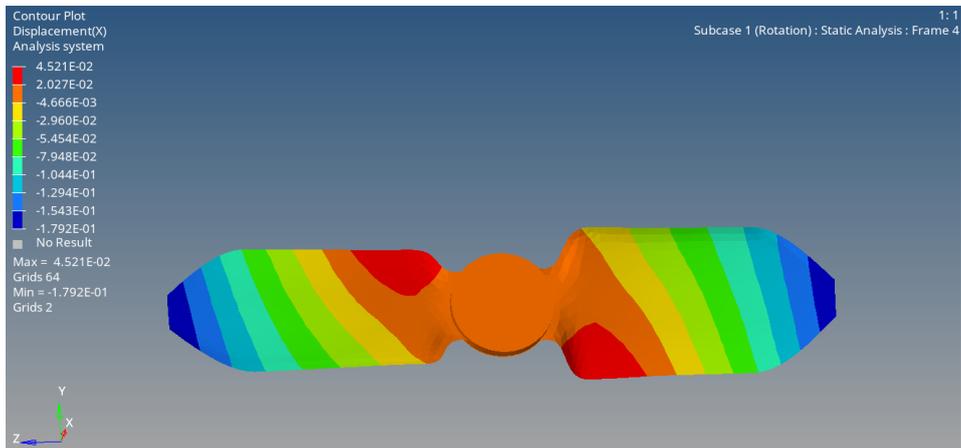


Figura 127: Spostamenti rispetto all'asse X

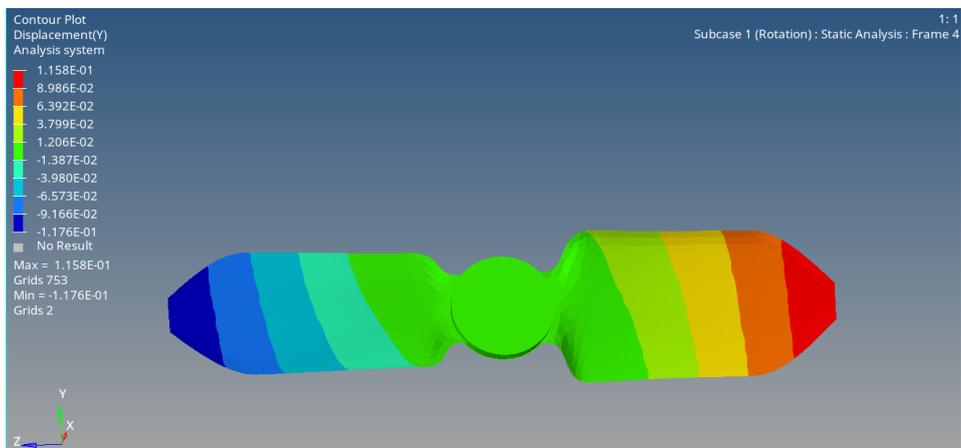


Figura 128: Spostamenti rispetto all'asse Y

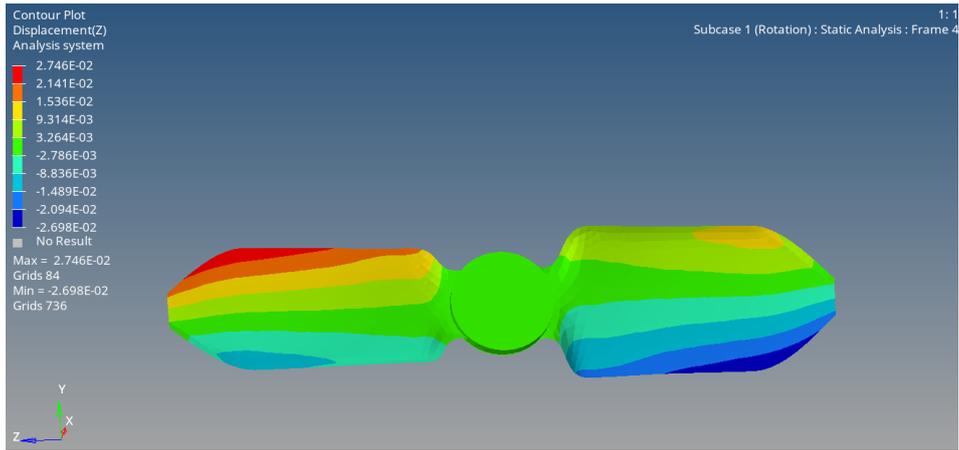


Figura 129: Spostamenti rispetto all'asse Z

10 Conclusioni

L'analisi modale ci restituisce le frequenze naturali del modello considerato e ci offre la panoramica migliore di come l'effetto della variazione di spessore e il cambiamento di dimensione della mesh influisca sui risultati ottenuti. Nel primo caso il passaggio da 1mm a 0.7mm di spessore ha visto il valore numerico delle frequenze naturali scendere di percentuali comprese tra il 17 e il 25%, viceversa il passaggio da 1mm a 1.3mm di spessore ha causato un aumento delle frequenze tra il 15 e il 22%. La variazione percentuale totale delle frequenze naturali nel passaggio di spessore da 0.7mm a 1.3mm invece si attesta intorno al 54%.

In merito alle variazioni numeriche in riferimento alle diverse dimensioni della mesh (5mm, 2mm e 1mm) i cambiamenti maggiori sono osservabili nel passaggio da 5mm a 2 mm con un accuratezza che aumenta di 2 ordini di grandezza se si va ad osservare la differenza nelle frequenze dei modi di vibrare analizzati come coppia (1-2 3-4 5-6 etc.). Meno significativa è invece la variazione di precisione nel passaggio da 2mm a 1 mm in cui l'ordine di grandezza rimane lo stesso e le differenze numeriche si assottigliano ulteriormente raggiungendo valori che si attestano tra metà e un sesto di quelli precedenti (2mm). È opportuno però introdurre una considerazione sul tempo necessario per generare la mesh, per effettuare l'analisi e risolvere la simulazione, il numero di elementi della mesh col diminuire della dimensione aumenta in maniera esponenziale e il tempo dedicato alla generazione manuale della mesh e il costo computazionale richiesto sono fattori che influiscono sulla scelta della dimensione corretta dal punto di vista accuratezza-costo.

Alla luce di questi fattori il valore consigliato per la generazione della mesh di un modello di queste dimensioni è 2mm, i risultati della mesh considerata infatti restituiscono risultati incomparabilmente più precisi della controparte da 5mm e il tempo necessario alla risoluzione della mesh da 1mm, in comparazione con quella da 2mm, non giustifica il miglioramento in accuratezza ottenuto.

L'analisi lineare rispecchia ciò che ci si aspetterebbe da un modello di elica sottoposto a semplice rotazione. Per quanto riguarda gli spostamenti era prevedibile aspettarsi la concentrazione dei valori massimi nel tip dell'elica e il corrispettivo valore minimo in prossimità del collegamento con l'albero. Un altro risultato evidente dall'analisi grafica dei risultati è la diversa distribuzione dei spostamenti lungo la direzione longitudinale dell'elica a seconda dello spessore, l'analisi infatti riporta un andamento pressoché lineare per quanto riguarda lo spessore minimo analizzato (0.7mm) mentre è sempre più evidente l'effetto della forza centrifuga man mano che lo spessore dell'elica aumenta, nel caso di maggior spessore (1.3mm) infatti la presenza di una maggiore massa totale, porta ad identificare la distribuzione degli spostamenti con un modello ampiamente diverso da quello lineare. Sempre in merito agli spostamenti è utile analizzare la variazione numerica di questi in relazione allo spessore e alla dimensione della mesh. In prima approssimazione è possibile affermare che la variazione di spessore da 1mm a 0.7mm porta ad un aumento degli spostamenti del 108%, i valori infatti risultano essere più che raddoppiati. Tale andamento dei valori numerici si ripete nel passaggio da 1mm a 1.3mm, ma in direzione speculare, i valori infatti risultano dimezzati con una diminuzione percentuale del 46% rispetto agli spostamenti dell'elica di riferimento con spessore da 10mm e una variazione totale dei valori (da 0.7mm a 1.3mm) che corrisponde a un incremento del +287% con

degli spostamenti praticamente quadruplicati. Per quanto riguarda invece la variazione dei risultati numerici in relazione al passaggio da una mesh meno fitta (5mm) ad una caratterizzata da un numero elevato di elementi (2mm) e di dimensione minore (1mm) è possibile notare che i valori dei range min-Max non risultano essere influenzati in maniera corposa dalla dimensione della mesh, ma l'andamento numerico dei valori che caratterizza il range risulta essere più lineare e con degli step sempre più uniformi.

In termini di deformazioni e tensioni i risultati attesi rispecchiano ancora una volta le attese, le zone di concentrazione di sforzi e deformazioni infatti risultano essere nella zona di collegamento tra l'elica e l'albero, in particolare nelle zone in prossimità del bordo d'attacco e di uscita e nella zona centrale dell'attacco pala-albero (la zona dell'elica più vicina all'albero). È possibile notare come per spessori più elevati (1.3mm) la zona interessata da tensioni/deformazioni si espande fino alle parti più interne dell'elica mentre per spessori più bassi (0.7mm) la zona interessata resta concentrata nell'intorno del collegamento con l'albero. È altresì interessante notare come all'aumentare dello spessore siano presenti delle zone in cui ci sono delle concentrazioni elevate di deformazioni sempre più marcate in corrispondenza delle zone ad elevata tensione. In merito ai valori numerici e al loro andamento in relazione allo spessore e alla dimensione della mesh, deformazioni e tensioni seguono un andamento pressochè identico con degli aumenti del 10% nel passaggio da 1mm a 0.7mm di spessore e una diminuzione dell'8% nel passaggio da 1mm a 1.3mm e una variazione totale dei valori numerici (da 0.7mm a 1.3mm) del 17%.

11 Bibliografia

- [1] Young, L.A. and Aiken, E.W., "Vertical Lift Planetary Aerial Vehicles: Three Planetary Bodies and Four Conceptual Design Cases," 27th European Rotorcraft Forum, Moscow, Russia, September 11-14, 2001.
- [2] Witold J. F. Koning, "Airfoil Selection for Mars Rotor Applications", Science and Technology Corporation Ames Research Center, Moffett Field, California NASA / CR-2019-220236
- [3] McMasters, J. H., and Henderson, M. L.: "Low-Speed Single-Element Airfoil Synthesis", Third International Symposium on the Science and Technology of Low Speed and Motorless Flight, Seattle, WA, 1979
- [4] Levy, D.-E., and Seifert, A.: "Simplified Dragonfly Airfoil Aerodynamics at Reynolds Numbers Below 8000", *Physics of Fluids*, vol. 21, 2009, p. 71901.
- [5] Munday, P. M., Taira, K., Suwa, T., Numata, D., and Asai, K.: "Nonlinear Lift on a Triangular Airfoil in Low-Reynolds-Number Compressible Flow", *Journal of Aircraft*, vol. 52, 2014
- [6] Wangwang Zhang, Bin Xu, Haitao Zhang, Changle Xiang, Wei Fan and Zhiran Zhao: "Analysis of Aerodynamic Characteristics of Propeller Systems" Based on Martian Atmospheric Environment - Vehicle Research Center, School of Mechanical Engineering, Beijing Institute of Technology
- [7] Johnson, W.: "Rotorcraft Aeromechanics" - New York: Cambridge University Press, 2013
- [8] Johnson, W.: "NDARC. NASA Design and Analysis of Rotorcraft." NASA TP 2015-218751, April 2015
- [9] Young, L. A., Aiken, E., Lee, P., and Briggs, G.: "Mars Rotorcraft: Possibilities, Limitations and Implications for Human/Robotic Exploration", IEEE Aerospace Conference, Big Sky, MT, 2005.
- [10] Johnson, W.: "Rotorcraft Aerodynamic Models for a Comprehensive Analysis." American Helicopter Society 54th Annual Forum, Washington, D.C., May 1998.
- [11] Datta, A.: "X3D — A 3D Solid Finite Element Multibody Dynamic Analysis for Rotorcraft." American Helicopter Society Specialists' Conference on Aeromechanics Design for Vertical Lift, San Francisco, CA, January 2016.
- [12] Wayne Johnson, Shannah Withrow-Maser, Larry Young, Carlos Malpica, Witold J.F. Koning, Winnie Kuang, Mireille Fehler, Allysa Tuano, Athena Chan - Ames Research Center, Moffett Field, California. Anubhav Datta, Cheng Chi, Ravi Lumba, Daniel Escobar - University of Maryland. J. Balaram, Theodore Tzanetos, Håvard Fjær Grip - Jet Propulsion Laboratory, California Institute of Technology. "Mars Science Helicopter Conceptual Design" March 2020 NASA/TM—2020–220485

- [13] Cheng Chi , Ravi Lumba , Yong S. Jung and Anubhav Datta: "Preliminary Structural Design and Aerodynamic Analysis of Mars Science Helicopter Rotors" ,Jet Propulsion Laboratory, California Institute of Technology, November 16-18, 2020
- [14] Wayne Johnson: "Mars Science Helicopter Mid-Year Review" - NASA Ames Research Center Activities, March 2020
- [15] <https://mars.nasa.gov/resources/24933/nasas-ingenuity-mars-helicopter/>
- [16] Shannah Withrow-Maser, Wayne Johnson, Larry Young, Witold Koning, Winnie Kuang, Carlos Malpica: "Mars Science Helicopter: Conceptual Design of the Next Generation of Mars Rotorcraft", Ames Research Center. J. Balaram, Theodore Tzanetos - Jet Propulsion Laboratory, California Institute of Technology.
- [17] Shannah Withrow-Maser, Wayne Johnson, Larry Young, Haley Cummings, Athena Chan: "An Advanced Mars Helicopter Design" NASA Ames Research Center. Theodore Tzanetos, J. Balaram, Jonathan Bapst - NASA Jet Propulsion Laboratory
- [18] Ashok Gopalarathnam, Benjamin A. Broughton, Bryan D. McGranahan, and Michael S. Selig: "Design of Low Reynolds Number Airfoils with Trips", North Carolina State University, University of Illinois, JOURNAL OF AIRCRAFT Vol. 40, No. 4, July–August 2003
- [19] Kristian Holm, Hossein Shakourzadeh and Matthias Goelke : "Practical Finite Element Analysis", Altair University Project 2014
- [20] Rahul Shedage "Normal Modal Analysis in Hypermesh" Feb. 15, 2017
- [21]
- [22]
- [23]