

Università degli Studi di Napoli Federico II

Scuola Politecnica e delle Scienze di Base

Dipartimento di Ingegneria Industriale

Corso di Dottorato in Ingegneria Industriale - XXXV ciclo



Tesi di Dottorato in Ingegneria Industriale

Design, analyses and development of innovative mechanical structures for ESO (European Southern Observatory) astronomical instrumentation focus on Adaptive Optics, in operational conditions, for the ELT (Extremely Large Telescope) class instrumentation of next generation

Relatore:

Ch.mo Prof. Ing. Francesco Timpone
UNINA - *Dipartimento di Ingegneria Industriale*

Candidato:

Dott. Vincenzo Cianniello
DR993918

Correlatore:

Dott. Ing. Vincenzo De Caprio
INAF - *Osservatorio Astronomico di Capodimonte*

ANNO ACCADEMICO 2021/2022

INTRODUZIONE	5
1. CENNI DI OTTICA E ASTRONOMIA	10
1.1 IL TELESCOPIO	12
1.1.1 <i>Le grandezze fondamentali</i>	13
1.1.2 <i>Gli oculari</i>	15
1.1.3 <i>Il telescopio: cenni storici</i>	18
1.2 LA CLASSIFICAZIONE DEI TELESCOPI.....	20
1.2.1 <i>I telescopi rifrattori</i>	20
1.2.2 <i>I telescopi riflettori</i>	21
1.2.3 <i>I telescopi Catadiottrici Cassegrain</i>	22
1.2.4 <i>Altre tipologie di telescopi</i>	24
1.3 LA MONTATURA DEI TELESCOPI	26
1.3.1 <i>Montatura equatoriale</i>	26
1.3.2 <i>Montatura altazimutale</i>	28
2. IL CONTESTO INTERNAZIONALE: ELT PROJECT	29
2.1 ESO - EUROPEAN SOUTHERN OBSERVATORY.....	30
2.1.1 <i>Le principali scoperte dell'ESO</i>	33
2.2 INAF: ISTITUTO NAZIONALE DI ASTROFISICA.....	35
2.3 L'EXTREMELY LARGE TELESCOPE	37
2.3.1 <i>ELT timeline e sito</i>	38
2.3.2 <i>La struttura del telescopio</i>	40
2.3.3 <i>The Dome: la cupola dell'ELT</i>	44
2.3.4 <i>Optical layout di ELT</i>	47
2.3.5 <i>Gli strumenti di ELT</i>	50
2.4 LA QUALITÀ OTTICA DI ELT.....	54
2.4.1 <i>Il Seeing</i>	54
2.4.2 <i>Ottiche attive e adattive</i>	55
3. MORFEO PROJECT: OTTICA ADATTIVA PER ELT	57
3.1 IL CICLO DI VITA DI UN PROGETTO.....	58
3.2 IL CONSORZIO MORFEO.....	60

3.3	MODALITÀ OPERATIVE DI MORFEO	65
3.4	MORFEO: LAYOUT OTTICO.....	68
4.	MORFEO: DAI REQUISITI ALLA FEA	71
4.1	DOCUMENTI DI RIFERIMENTO	71
4.2	IL CONTRIBUTO DI PM0 IN MORFEO	73
4.3	MSS REQUIREMENTS	75
4.3.1	<i>Accessibilità</i>	78
4.3.2	<i>Condizioni ambientali</i>	79
4.3.3	<i>Sistema di riferimento e volume di ingombro</i>	79
4.3.4	<i>Posizione dei punti di attacco sulla NP</i>	81
4.4	STANDARD FEA IN ANSYS	82
4.4.1	<i>Elementi FE utilizzati in ANSYS</i>	85
4.4.2	<i>Materiali di uso comune in ANSYS</i>	88
4.5	VERIFICHE STRUTTURALI IN AMBIENTE ESO	90
4.5.1	<i>Analisi statica - Static Structural</i>	91
4.5.2	<i>Analisi Modale - Modal Eigenfrequency</i>	93
4.5.3	<i>Analisi di instabilità - Eigenvalue Buckling</i>	95
4.5.4	<i>Analisi da vento - Wind analysis</i>	95
4.5.5	<i>Distorsione indotta dalla NP - Induced Distortion Analysis</i>	97
4.5.6	<i>Analisi Sismica - Earthquake analysis</i>	98
5.	MORFEO MSS DESIGN & FEA	104
5.1	MORFEO MSS: LO SVILUPPO MECCANICO	104
5.2	MORFEO MSS: IL MODELLO PER LA FEA	113
5.2.1	<i>Caratteristiche geometriche del modello FE</i>	117
5.2.2	<i>Caratteristiche dei materiali utilizzati</i>	125
5.2.3	<i>Vincoli e carichi del modello FE</i>	127
5.3	RISULTATI FEA	133
5.3.1	<i>FEA – Analisi Statica e Modale</i>	134
5.3.2	<i>FEA – Analisi di Earthquake</i>	139
5.3.3	<i>FEA – Analisi da vento</i>	150
5.3.4	<i>FEA – Distorsione indotta dalla NP</i>	155
5.3.5	<i>FEA – Stabilità in condizioni operazionali</i>	157

5.3.6	<i>FEA - Analisi di Buckling</i>	161
6.	SUBMODELING FEA PER LA MSS	163
6.1	MSS FLANGE DI INTERFACCIA SULLA NP - FEM.....	163
6.1.1	<i>Caratteristiche dei materiali utilizzati</i>	166
6.1.2	<i>Vincoli e carichi del modello FEM</i>	166
6.1.3	<i>Risultati FEA</i>	169
6.1.4	<i>Collegamenti bullonati</i>	173
6.2	GIUNTO CENTRALE DELLA MSS – FEM.....	175
6.2.1	<i>Risultati FEA</i>	180
6.3	GIUNTO PER OPTOMECH – FEM.....	184
6.3.1	<i>Risultati FEA</i>	187
7.	CONCLUSIONI	189
	BIBLIOGRAFIA	192



INTRODUZIONE

L'attività di ricerca, oggetto di questo lavoro di tesi, è stata svolta presso l'**INAF (Istituto Nazionale di Astrofisica) - Osservatorio Astronomico di Capodimonte**, dove sono titolare di un assegno di ricerca, e presso l'**Università degli Studi di Napoli - Dipartimento di Ingegneria Industriale (DII)** dove ho condotto tutte le attività di dottorato.

In INAF-OACN sono deputy manager del WP (work package) "**PM0 - Main Structure**", che è incaricato sia della progettazione meccanica che della validazione strutturale dello strumento **MORFEO** (Multi-conjugate adaptive Optics Relay For ELT Observations) per l'Extremely Large Telescope. Il mio responsabile scientifico in INAF è l'**Ing. Vincenzo De Caprio** (WP Manager del gruppo) e il mio tutor di dottorato è il **Prof. Ing. Francesco Timpone (DII)**.

Per presentare chiaramente il contesto in cui si è sviluppato questo lavoro di dottorato, è necessario fare una piccola panoramica sulle attività che sono state svolte durante questo triennio (o meglio dal 1Q19, momento in cui entro nel progetto MORFEO) e che hanno portato ad una approvazione completa, da parte di ESO, di tutta la progettazione meccanica preliminare sotto la nostra responsabilità in INAF-OACN.

Gli *obiettivi* della presente tesi di dottorato sono i seguenti:

- introdurre allo scenario internazionale nel quale operano i player che sviluppano **tecnologie innovative "ground-based"** per le osservazioni dello spazio;
- definire gli standard tecnici che tali "prodotti tecnologici" devono garantire per rispondere alle **esigenze scientifiche dei prossimi decenni**;
- definire gli standard qualitativi che ESO ed INAF si sono imposti per assicurarsi di progettare e produrre prodotti di avanguardia per i prossimi 30 anni;



- condividere l'intero flusso logico di una **progettazione meccanica preliminare** di uno strumento scientifico per ELT (Extremely Large Telescope);
- mostrare sia le metodologie di verifica che il dimensionamento strutturale degli item sviluppati "in house" ed approvati da ESO;
- fornire una panoramica sugli sviluppi futuri nonché sui futuri miglioramenti che si potrebbero integrare nei modelli agli elementi finiti delle strutture ingegnerizzate. Ciò sarà cruciale per prevedere con maggiore accuratezza il comportamento, sotto carichi operazionali, di tali strutture.

Il desiderio incessante di conoscenza, che contraddistingue l'essere umano lo ha guidato, fin dall'antichità, verso lo studio dell'universo. L'osservazione del cielo ha permesso agli uomini di orientarsi e di scandire il tempo, ma i primi passi in avanti verso la scienza moderna si ebbero quando Galileo Galilei realizzò il suo primo cannocchiale. Con il passare degli anni sono stati costruiti telescopi sempre più grandi e performanti, in grado di osservare oggetti celesti molto lontani, rendendo possibile uno studio più dettagliato del Cosmo. Gli astronomi, nel tentativo di risolvere alcuni dei quesiti più antichi e irrisolti riguardanti l'universo, hanno approfondito lo studio dei corpi celesti, delle galassie e dei buchi neri. L'osservazione astronomica si basa proprio sullo studio degli oggetti celesti tramite l'utilizzo di telescopi. Questi hanno un duplice scopo: raccogliere molta luce ed ingrandire l'immagine entro un campo di vista definito dalle caratteristiche optomeccaniche dello strumento. A seconda dell'oggetto di studio è desiderabile avere un campo di vista che può essere fortemente variabile. Dall'inizio dell'astronomia moderna, nata con l'invenzione della fotografia, si è intuita l'importanza della realizzazione di telescopi a grande campo che consentissero indagini di un interesse scientifico sempre maggiore.

In questo contesto nel 2027 si prevede la "prima luce" del **telescopio ELT**, l'Extremely Large Telescope che, con il suo specchio primario da **39 metri** di diametro, sarà il più grande telescopio



ottico-infrarosso al mondo, “**il più grande occhio del mondo rivolto verso il cielo**”. L’ELT rappresenta un nuovo paradigma di telescopio terrestre, un’infrastruttura con prestazioni di gran lunga superiori rispetto alla strumentazione attualmente esistente e/o pianificata nel prossimo decennio. Dotato delle tecnologie più avanzate, l’ELT punta a rivoluzionare la percezione dell’Universo come fece il telescopio di Galileo, 400 anni fa.

Dal 2005, l’**European Southern Observatory (ESO)** lavora con la comunità scientifica e tecnologica internazionale alla realizzazione di tale progetto. L’Italia è parte attiva nella costruzione del telescopio, avendo vinto la più grande commessa mai assegnata per un progetto di astronomia da Terra. **Adoptica**, ad esempio, un consorzio costituito da aziende italiane, si occuperà della costruzione dell’unità di ottica adattiva dello specchio deformabile M4. Il **consorzio ACE**, costituito da Astaldi & Cimolai con EIE Group, si occupa della progettazione e realizzazione meccanica della struttura principale e della cupola di ELT.

L’**Istituto Nazionale di Astrofisica (INAF)**, si occupa della progettazione e della implementazione di **MORFEO**, “Multi-conjugate adaptive Optics Relay For ELT Observations”, il più sofisticato modulo di ottica adattiva multi-coniugata, ideato per annullare gli effetti negativi prodotti dalla turbolenza atmosferica e per restituire immagini con un altissimo livello di risoluzione. Nel seguente elaborato sarà illustrato, come case study, lo studio e la progettazione meccanica preliminare della **MSS (Main Support Structure)** di MORFEO. Questo lavoro di dottorato si incardina nel contesto di un progetto internazionale di lunga durata che vedrà la sua conclusione presumibilmente nel 2030 con l’installazione in situ di MORFEO sulla piattaforma Nasmyth dell’ELT. È dal gennaio 2019 che lavoro in INAF – Osservatorio Astronomico di Capodimonte prima da borsista di ricerca (1 anno) e poi da assegnista di ricerca (3 anni), collaborando alla realizzazione di questo grande progetto. Tutte le attività di PhD, infatti, sono state svolte durante questo periodo anche grazie alla copertura economica garantita dal progetto



MORFEO. La funzione principale della **MSS** di **MORFEO** è quella di fornire un supporto alle opto-meccaniche ed ai sottosistemi che su di essa verranno integrati. Per tali ragioni la progettazione strutturale dovrà essere orientata a fornire un prodotto (la **MSS**) particolarmente rigido e stabile al fine di evitare di indurre delle deformazioni statiche e/o dinamiche ai sottosistemi installati sulla struttura. La meccanica della **MSS**, naturalmente, dovrà rispettare specifici vincoli relativi a dimensioni di ingombro, volumi di passaggio e massa complessiva nonché tutta una serie di specifiche prestazionali dettate dalle tolleranze ottiche dei vari sottosistemi integrati su di essa.

Nei prossimi capitoli si introdurranno, dapprima, i concetti chiave riguardanti l'astronomia fornendo un'ampia panoramica sulle attuali tipologie di telescopi disponibili. Si approfondirà la loro evoluzione e classificazione, con particolare attenzione ai telescopi ottici/infrarossi, appartenendo l'ELT a tale categoria. Saranno, pertanto, necessari alcuni capitoli per entrare in questo contesto e solo successivamente si esporrà la trattazione ingegneristico/progettuale sulla **MSS** di **MORFEO**.

Al fine di chiarire pienamente il contesto internazionale preposto alle attività di progettazione e costruzione del telescopio, è necessario presentare brevemente tutti i players coinvolti in tale processo: organizzazioni inter-governative, enti di ricerca, consorzi pubblici e privati. Si vedranno i ruoli specifici e le caratteristiche di soggetti come: l'**ESO (European Southern Observatory)** la principale organizzazione intergovernativa scientifica e tecnologica in astronomia; l'**INAF (Istituto Nazionale di Astrofisica)** impegnato nei maggiori programmi che definiranno il futuro dell'Astronomia e dell'Astrofisica dei prossimi decenni. Si cercherà, inoltre, di presentare in larga scala le tematiche riguardanti l'**Ottica Adattiva**, di cui l'INAF è leader a livello mondiale, e gli innumerevoli vantaggi che essa comporta per la scienza.

I modelli CAD che si presenteranno in questo lavoro sono stati realizzati mediante l'utilizzo del software CAD 3D **Autodesk Inventor**[®] mentre tutte le analisi agli elementi finiti sono state

effettuate con l'ausilio del software **Ansys Workbench®**. Nel corso della trattazione non mancheranno richiami dettagliati anche al **metodo agli elementi finiti** ed alle **specifiche ESO** per la progettazione meccanica e la validazione strutturale cui si è vincolati.

Si analizzeranno, infine, come **kernel** del seguente elaborato di tesi, le attività di progettazione meccanica e validazione strutturale svolte sul modulo ottico MORFEO, con particolare attenzione alla **MSS**. Sarà presentata, preliminarmente, la progettazione meccanico-strutturale della prima soluzione trovata, ed in ottica di mass saving e di ottimizzazione strutturale intorno al nuovo disegno ottico, sarà successivamente presentata la soluzione definitiva pienamente approvata da ESO durante la PDR (Preliminary Design Review). Il processo logico che porta alla validazione strutturale di un item nel contesto ESO - ELT, è rappresentato nel seguente grafico.

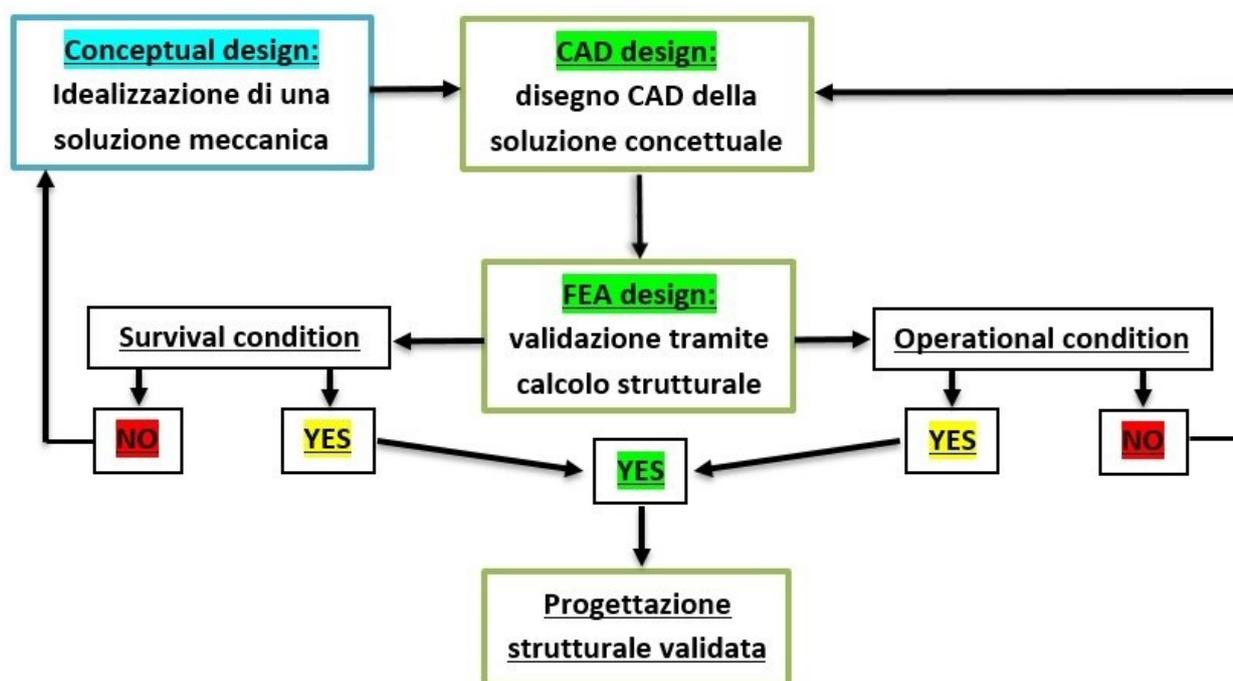


Figura 1. Schema validazione strutturale



1. CENNI DI OTTICA E ASTRONOMIA

L'**astronomia** è la scienza che si occupa dello studio dei corpi celesti che fanno parte dell'universo, ovvero i pianeti, i satelliti, le stelle, le galassie e le comete. Etimologicamente, la parola astronomia deriva dal greco e significa "**legge delle stelle**" e si divide in più gruppi: *l'astrometria*, che si sofferma sulla posizione e sul moto degli astri; *la meccanica celeste*, che consente di applicare le leggi della meccanica allo studio dei moti dei corpi celesti, i quali subiscono l'azione di forze di origine gravitazionale; *l'astrofisica*, la quale esamina la composizione chimica e lo stato fisico degli astri ed infine *la cosmologia*, che si occupa dell'universo nella sua totalità. Attualmente l'astronomia comprende anche *la radioastronomia*, che si occupa delle onde radio emesse dai corpi celesti.

L'astronomia è tra le scienze più antiche della storia dell'uomo ed a testimoniarlo sono graffiti, sculture e oggetti celesti incisi sulle rocce di sepolcri primitivi. Una delle domande che l'essere umano si pone con maggiore frequenza riguarda proprio l'origine del cosmo ed i meccanismi che lo governano.

I popoli antichi notarono che l'aspetto del cielo mutava con regolarità, basti pensare all'alternarsi del giorno e della notte, al fatto che il Sole sorge ad Oriente e tramonta ad Occidente, all'alternarsi delle fasi lunari, al movimento delle stelle, alla periodicità delle stagioni e al movimento del Sole.

Egizi, Babilonesi e Cinesi sono considerati i primi astronomi, in quanto raggrupparono le stelle in costellazioni, suddivisero il giorno in 24 ore, crearono i primi calendari, anche se non possedevano alcuna conoscenza sulla natura dell'universo e, pertanto, si limitavano ad osservare le stelle ed a ricavarne oracoli sul futuro. Quando si aveva la capacità di prevedere un'eclissi o altri fenomeni celesti, che potevano essere interpretati come una manifestazione della volontà divina, l'astronomia rappresentava un potente mezzo al fine di avere una posizione sociale di rilievo. È

proprio in questi periodi che il confine tra astronomia ed astrologia diventava sempre più sottile. Per secoli l'astronomia è stata praticata ad occhio nudo, trovando delle connessioni tra la ciclicità dei fenomeni celesti e la definizione di calendari agricoli, ma solo con i Greci si cercò di trovare una spiegazione a tali eventi che da anni venivano solo osservati. Lo studio della volta celeste permetteva di orientarsi, di stabilire il periodo adatto per la semina, di scandire il tempo e le stagioni e trovava ampio impiego nel campo della navigazione. Gli antichi Egizi riuscivano a prevedere le inondazioni del Nilo, i Fenici si orientavano in mare aperto, mentre i Greci avevano una visione filosofica dell'astronomia, ed è proprio grazie a questo che si riuscì a scindere l'astronomia dall'astrologia. Con la teoria di Tolomeo¹, ogni progresso scientifico, che fosse in opposizione con quanto condiviso dalla religione cristiana, veniva pesantemente ostacolato. Nei secoli successivi, Niccolò Copernico elaborò la teoria eliocentrica, che poneva il Sole al centro dell'universo e che permise il passaggio all'astronomia moderna. Nel diciassettesimo secolo, Galileo Galilei inventò il primo telescopio, che gli permise di effettuare molteplici scoperte, infatti grazie ad esso riuscì a capire che la superficie della Luna non era liscia ma presentava giganteschi crateri, notò che Venere presentava fasi simili a quelle lunari e che la Luna fosse interposta tra la Terra e il Sole.

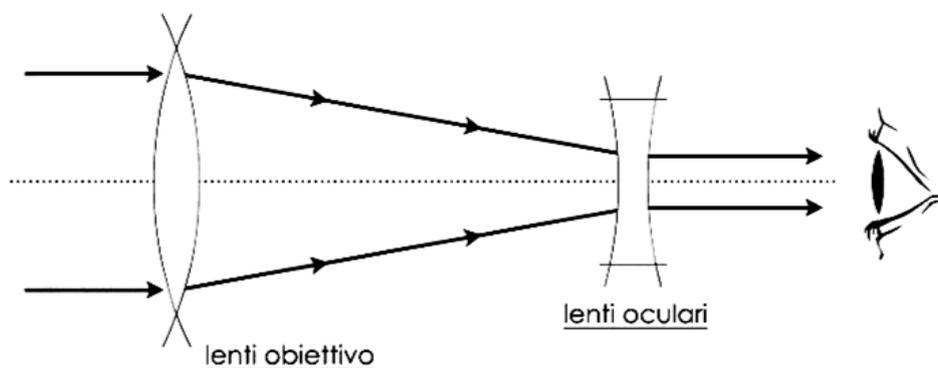


Figura 2. Schema Ottico Galileiano

¹ **La teoria di Tolomeo:** si basa sull'ipotesi geocentrica, secondo la quale la Terra è al centro dell'universo e tutti gli altri corpi celesti ruotano attorno ad essa.



Nello stesso periodo, Isaac Newton formulò la “Legge di gravitazione universale”, la quale spiegava il moto dei pianeti e delle stelle, affermando che due corpi si attirano con una forza direttamente proporzionale al prodotto delle loro masse e inversamente proporzionale al quadrato della loro distanza. Fu proprio grazie a Newton che si iniziò a descrivere il Cosmo tramite delle leggi fisiche che fossero, finalmente, indipendenti dalle credenze religiose.

Grazie all'avvento dei primi telescopi ottici, fu possibile osservare anche le superfici dei pianeti e nel XIX secolo, con l'introduzione dello spettroscopio, si sono ottenute maggiori informazioni circa la composizione chimica dei corpi celesti. Fu così che vennero gettate le basi dell'astronomia moderna e pertanto fu possibile studiare i fenomeni che caratterizzavano l'universo. Tramite le missioni esplorative nello spazio, l'uomo ha scoperto che la nostra galassia, la Via Lattea, non è l'unico ammasso di stelle e che le varie galassie non sono fisse ma si spostano, allontanandosi sempre di più, e da queste considerazioni fu possibile formulare la teoria dell'espansione dell'universo e del Big Bang.

Grazie alle innovazioni nel campo tecnologico, gli strumenti utilizzati al giorno d'oggi sono di gran lunga più performanti rispetto a quelli passati, basti pensare ai grandi telescopi da Terra, ai radiotelescopi e ai moderni telescopi orbitali.

1.1 Il telescopio

I telescopi astronomici sono strumenti ottici attraverso i quali è possibile esplorare l'universo, in virtù del fatto che consentono un notevole ingrandimento dell'immagine, permettendo inoltre di catturare molta più luce di quanto è in grado di fare l'occhio umano. È proprio questo il motivo per il quale, ad occhio nudo, molti oggetti celesti risultano invisibili.

Esistono numerose tipologie di telescopi, ciascuno dei quali presenta due elementi fondamentali: *l'obiettivo*, che corrisponde ad un gruppo ottico di grandi dimensioni, rivolto verso l'oggetto da



osservare e *l'oculare*, ovvero un gruppo ottico di dimensioni minori, rivolto verso l'elemento rilevatore. I raggi luminosi entrano nel telescopio e vengono messi a fuoco in un singolo punto detto *fuoco* o *punto focale*, successivamente i raggi focalizzati vengono ingranditi tramite una lente molto potente o da un insieme di lenti, chiamata oculare, per fornire immagini ingrandite.

L'oculare funziona in maniera opposta rispetto all'obiettivo, dato che preleva i raggi luminosi focalizzati e li invia all'occhio umano. Per poter descrivere le varie tipologie di telescopi, è necessario definire, innanzitutto, le caratteristiche principali che li contraddistinguono.

1.1.1 Le grandezze fondamentali

Tra le principali grandezze caratteristiche di un telescopio ritroviamo il diametro del primario, la lunghezza focale, il rapporto focale e l'ingrandimento. L'apertura di un telescopio rappresenta il diametro dell'obiettivo espresso in millimetri o metri oppure pollici, a seconda del sistema metrico di riferimento. Maggiore è l'apertura e maggiore sarà la quantità di luce raccolta e di conseguenza aumenterà il potere risolutivo, ottenendo immagini di qualità nettamente superiore, con una maggiore nitidezza ed un maggior livello di dettaglio.

La lunghezza focale è definita come la distanza tra la lente e il punto focale, nel caso dell'obiettivo, mentre è pari alla distanza tra l'oculare e il punto focale nel caso dell'oculare, ed è possibile ottenere un ingrandimento maggiore all'aumentare della lunghezza focale del telescopio. Un oculare con una lunghezza focale minore fornisce un ingrandimento minore ma campi di vista molto estesi ed una luminosità nettamente inferiore, dato che la stessa quantità di luce catturata viene dispersa su un'area maggiore.

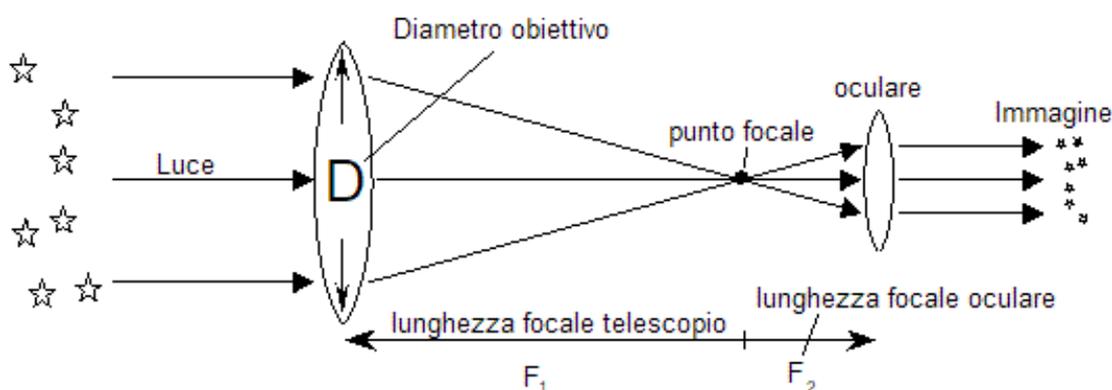


Figura 3. Layout ottico semplificato di un telescopio

Il rapporto focale è il rapporto tra la lunghezza focale e la sua apertura ed esprime la luminosità dello strumento, intesa come la capacità di catturare più luce. La luminosità del telescopio dipende dal rapporto d'apertura, inteso come il rapporto tra il diametro e la lunghezza focale dell'obiettivo. Minore è il rapporto focale e maggiore è la luminosità del telescopio. Quando più rapporti focali differenti sono posti a confronto, si parla di telescopio lento nel caso in cui i rapporti focali risultano elevati, o veloce, per rapporti focali bassi, in funzione del tempo necessario per registrare l'immagine del corpo celeste in oggetto. Infine, l'ingrandimento indica quante volte l'immagine di un oggetto astronomico viene ingrandita rispetto alla visione senza telescopio. L'ingrandimento è espresso come il rapporto tra la lunghezza focale del telescopio e quella dell'oculare. Per osservare i pianeti sono necessari ingrandimenti elevati, dovendo contrastare anche i disturbi dovuti alla turbolenza atmosferica, ma quando si supera un ingrandimento pari a tre volte il diametro dell'obiettivo, diminuisce la qualità dell'immagine. Quindi vi è un limite oltre il quale non è possibile ottenere un ingrandimento maggiore e tale limite è dettato proprio dal diametro del telescopio. Bisogna tenere presente che i telescopi vengono classificati in base all'apertura, che risulta di gran lunga più importante rispetto all'ingrandimento, dato che permette di valutare la capacità di mostrare dettagli di oggetti piccoli, deboli o distanti. Non sempre un'apertura del telescopio elevata è un fattore positivo, spesso conviene utilizzare un'apertura più piccola per ottenere risultati migliori, ciò accade soprattutto quando l'atmosfera terrestre è particolarmente



agitata. Le caratteristiche atmosferiche che permettono di definire le condizioni del cielo sono il *seeing*, che tiene conto della turbolenza dell'aria, e della trasparenza, che si riferisce alla purezza dell'aria e che dipende dalla quantità di vapore acqueo e di polvere presenti nell'atmosfera. Un'ulteriore caratteristica del telescopio è il campo visivo, definito come la distanza tra i bordi opposti dell'immagine fornita ed è espresso come il rapporto tra il campo visivo dell'oculare ed il corrispondente ingrandimento.

1.1.2 Gli oculari

Esistono varie tipologie di oculari che differiscono in base alle tipologie di focali e di schemi ottici. È di estrema importanza scegliere la tipologia di oculare adatta al tipo di applicazione a cui deve essere destinata, in maniera tale da poter sfruttare al massimo le potenzialità dello strumento, evitando eventuali difetti, dette aberrazioni. Inoltre la qualità dell'immagine è influenzata proprio dall'elemento ottico meno performante che costituisce il telescopio, di conseguenza avere un telescopio performante dotato di un oculare non adatto, non permette di ottenere immagini qualitativamente perfette. Esistono vari schemi per poter costruire gli oculari, lo schema ottico più semplice è quello di **Huygens**, il quale fornisce immagini di qualità solo al centro del campo ed è costituito da due lenti piano-convexe, ovvero che presentano una parte piana e quella opposta convessa. Il problema di questo schema è legato all'aberrazione sferica, un difetto che si verifica sia con le lenti che con gli specchi. Nello specifico, i raggi prodotti da una sorgente puntiforme posta sull'asse del sistema ottico si incontrano in un punto immagine posto anch'esso sull'asse, invece, nel caso di aberrazione sferica, i raggi si incontrano in punti diversi dell'asse, a seconda della loro distanza dall'asse stesso.

Di conseguenza ciascun raggio ha una distanza focale differente, causando un'immagine imprecisa. La prima evoluzione di tale schema è il Ramsden, il quale, sfruttando lenti aggiuntive,

permette di ottenere immagini qualitativamente migliori, risolvendo il problema dell'aberrazione sferica e introducendo quella cromatica. Quest'ultima si manifesta quando la sorgente da cui proviene la luce non è monocromatica, ma è costituita da più frequenze e di conseguenza i raggi luminosi non convergeranno più in un unico punto, dato che l'indice di rifrazione della lente è funzione della frequenza della luce che lo investe; tale fenomeno è chiamato dispersione. I raggi a frequenza differente saranno diversamente deviati, ovvero le radiazioni più vicine alla frequenza del rosso subiranno una deviazione minore, a differenza di quelle più vicine al violetto, che invece saranno notevolmente deviate. In definitiva, l'immagine è confusa e formata da più immagini, ciascuna corrispondente ad una frequenza del fascio ed i bordi dell'immagine dell'oggetto osservato appariranno molto colorati. Ulteriori schemi ottici, più recenti, sono l'**Ortoscopico** e il **Plossl**, il primo è adatto per l'osservazione dei pianeti, il secondo invece, con un campo apparente estremamente grande, decisamente maggiore rispetto a quello degli ortoscopici, permette di osservare il cielo profondo.

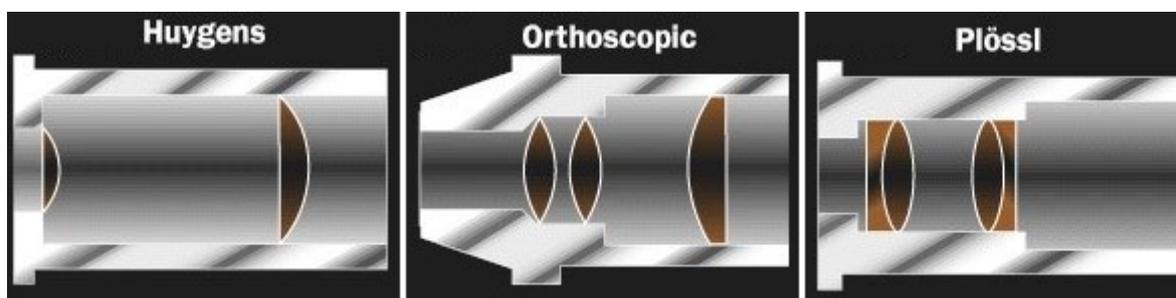


Figura 4. Principali tipologie di schemi ottici

Il campo apparente, il quale dipende dallo schema ottico impiegato, rappresenta l'ampiezza di campo che l'oculare ricopre "a vuoto", ovvero quando non è applicato al telescopio. Tale campo risulta inferiore rispetto al campo reale, che è la porzione di cielo realmente inquadrata dal telescopio e che è pari al rapporto tra il campo apparente e l'ingrandimento del telescopio.

Infine, è possibile esprimere due ulteriori grandezze, relazionate all'oculare del telescopio, ovvero la pupilla d'uscita e l'estrazione pupillare. La prima rappresenta il diametro del fascio luminoso in uscita dall'oculare di ogni telescopio. Il nostro occhio ha una pupilla d'uscita del diametro massimo di 0,6-0,8 millimetri, quando si adatta al buio, quindi se il fascio uscente dall'oculare ha un diametro maggiore, non tutta la luce raggiungerà il nostro occhio e ci sarà una perdita di luminosità. Quindi la pupilla d'uscita deve avere un diametro inferiore a quella dell'occhio umano, tale grandezza si esprime come il rapporto tra il diametro dell'obiettivo del telescopio e l'ingrandimento.

L'estrazione pupillare rappresenta la distanza alla quale deve trovarsi l'occhio dell'osservatore, rispetto alla lente dell'oculare, affinché la visione sia ottimale. Dipende dalla lunghezza focale dell'oculare e dal suo campo apparente, infatti minore è la lunghezza focale dell'oculare, maggiore sarà l'ingrandimento e minore sarà l'estrazione pupillare.

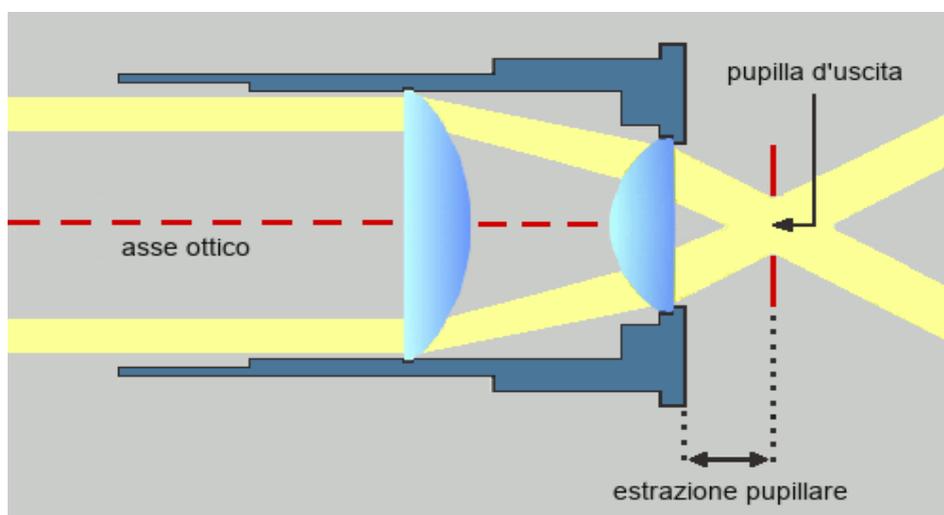


Figura 5. Rappresentazione dell'estrazione pupillare e della pupilla d'uscita dell'oculare



1.1.3 Il telescopio: cenni storici

L'invenzione del telescopio risale al diciassettesimo secolo e fu opera di un artigiano del vetro olandese, Hans Lippershey. Il primo uomo che comprese appieno le potenzialità di tale strumento e che lo utilizzò per osservare il cielo fu Galileo Galilei nel 1609. Il telescopio Galileiano è dotato di un obiettivo piano-convesso con una lunghezza focale di 75-100 cm e un oculare piano-concavo con una focale di 5 cm circa, il quale è posto all'interno di un tubo e può essere movimentato, al fine di regolare il fuoco. L'apertura dell'obiettivo era di 2,5 cm e l'ingrandimento era compreso tra 15 e 20. L'oculare, essendo costituito da una lente divergente, intercetta i raggi provenienti dall'obiettivo e li rende paralleli, formando, all'infinito, un'immagine virtuale, ingrandita e dritta. Le aberrazioni a cui erano soggette tali osservazioni erano notevoli e la qualità delle immagini era scadente. Successivamente, Kepler introdusse delle modifiche, ovvero utilizzò una combinazione di lenti convesse che però fornivano un'immagine invertita e che poteva essere resa dritta tramite una terza lente. Negli anni a seguire iniziò a nascere l'esigenza di adoperare telescopi di qualità superiore; al fine di aumentare l'ingrandimento, si iniziarono a costruire tubi ottici sempre più lunghi. Da qui sorsero i primi problemi legati all'impossibilità di mantenere allineate le ottiche ed il vento rendeva inutilizzabili tali strumenti. I primi telescopi erano rifrattori; solo a partire dal diciottesimo secolo, con Isaac Newton, si diffusero i primi telescopi riflettori. Nel mentre, erano numerosi gli studiosi che cercavano di risolvere il problema delle aberrazioni ma, le conoscenze del tempo, non lo resero possibile. Nel 1636, il francese Marsenne propose due strumenti ottici simili al Gregoriano e al Cassegrain ma, scoraggiato da Cartesio, il quale criticò aspramente le sue idee, non ebbe mai il coraggio di costruire i telescopi da lui stesso ideati. Successivamente James Gregory, ignaro del lavoro di Marsenne, realizzò un telescopio composito a due specchi, detto Gregoriano. Un primo passo in avanti si ebbe con Isaac Newton; egli dimostrò che la luce bianca era costituita da un insieme di più colori e ciò permise di affrontare il problema delle aberrazioni



cromatiche. Inoltre Newton costruì un telescopio riflettore dotato di uno specchio secondario inclinato di 45 gradi, cosa per niente banale a quei tempi. Nello stesso periodo un professore di fisica, Cassegrain, realizzò un telescopio riflettore, con una configurazione ottica differente da quella di Newton. In molti, pensavano che il primo a realizzare un telescopio riflettore fosse Cassegrain e non Newton, il quale rivendicò la sua invenzione e criticò duramente il telescopio del suo rivale.

I telescopi a rifrazione fornivano immagini di qualità migliore, ma erano soggetti ad aberrazione cromatica, invece quelli a riflessione erano limitati dalla tecnologia di quei tempi. John Hadley fu il primo a realizzare un riflettore di grandi dimensioni, ma le immagini risultavano comunque meno luminose del miglior rifrattore disponibile all'epoca, ovvero, quello di Huygens. Nel diciottesimo secolo, il più grande costruttore di riflettori fu James Short e nel 1773 l'astronomo William Herschel conseguì le prime scoperte astronomiche proprio con un telescopio riflettore. Fu solo nel diciannovesimo secolo, con Fraunhofer, che i rifrattori presero il sopravvento, grazie agli studi sulla fabbricazione dei vetri. Nasmyth realizzò un riflettore composto, in configurazione Cassegrain, che consentiva all'osservatore di mantenere una posizione fissa. Da qui in avanti furono registrati numerosi progressi, come ad esempio, si iniziò ad alluminare gli specchi tramite l'evaporazione dell'alluminio in una campana di vetro. Al giorno d'oggi, i progressi tecnologici hanno portato alla realizzazione di telescopi innovativi, come l'NTT (New Technology Telescope) il quale, consente all'intero edificio a cupola di ruotare solidalmente al telescopio, l'Hubble Space Telescope, che fu mandato in orbita nel 1990 ed il **VLT (Very Large Telescope)**. Quest'ultimo sfrutta l'ottica adattiva e tale tecnologia sarà alla base del più grande telescopio al mondo, ovvero l'**ELT (Extremely Large Telescope)**.

1.2 La classificazione dei telescopi

I telescopi ottici possono essere classificati in base alla tipologia di schema ottico impiegato, tenendo conto delle prestazioni e quindi del tipo di uso a cui sono destinati. Una prima classificazione può essere effettuata considerando la tipologia di mezzi ottici utilizzati per costruire gli obiettivi: nel caso in cui si adoperano le lenti, si dicono **telescopi rifrattori**, invece nel caso degli specchi, si parla di **telescopi riflettori**. Esistono anche delle combinazioni miste tra lenti e specchi e in tal caso si parla di **telescopi catadiottrici**.

1.2.1 I telescopi rifrattori

Nei telescopi rifrattori la luce raccolta dall'obiettivo viene focalizzata sul punto F, il quale coincide con il fuoco dell'oculare. La lente si trova all'inizio del tubo, mentre l'oculare è posto alla fine. Al fine di evitare che la lente funga da prisma, scomponendo la radiazione bianca nelle sue componenti, non è opportuno utilizzare una lente semplice, ma è necessario adoperare coppie di due o più lenti. Esistono principalmente tre tipologie di rifrattori:

- **rifrattori acromatici**, nel caso in cui l'obiettivo è costituito da due lenti con vetri caratterizzati da indici di rifrazione differenti, che permettono così di ridurre l'aberrazione cromatica;
- **rifrattori semi-apocromatici**, che consentono di ridurre ulteriormente tale aberrazione;
- **rifrattori apocromatici**, in cui l'obiettivo è costituito da un doppietto o tripletto di lenti con vetri a bassa dispersione, sottoposti a trattamenti antiriflesso, che possono garantire un'elevatissima trasmissione della luce incidente nonché limitare l'aberrazione cromatica.

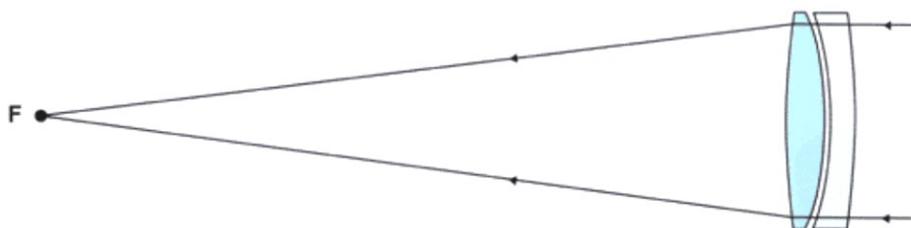


Figura 6. Schema di un telescopio rifrattore



Il vantaggio principale dei rifrattori è dovuto al fatto che il tubo ottico è chiuso, di conseguenza, all'interno non vi può accedere polvere o umidità. Le immagini che si ottengono hanno un elevato contrasto ed un'alta risoluzione ma, un problema di questa tipologia di telescopio risiede nel passaggio della luce attraverso il vetro, poiché, così facendo, i raggi vengono deviati con angolazioni differenti, generando dei contorni luminosi attorno agli oggetti osservati, inoltre, essi risultano costosi ed estremamente ingombranti. In base alla posizione in cui si trova l'oculare, lungo il percorso ottico dei raggi, esistono due tipologie di telescopi rifrattori, ovvero il Kepleriano e il Galileiano.

Nel *telescopio Galileiano* l'oculare è una lente divergente, pertanto, l'immagine fornita è dritta. Siccome il campo visivo è ridotto e l'illuminazione non è uniforme (diminuisce, infatti, dal centro verso il bordo) questa configurazione ottica fu abbandonata. Il *telescopio Kepleriano* sostituisce la lente divergente con una convergente, riuscendo così ad ottenere un campo visivo di gran lunga più esteso, ma le immagini ottenute appariranno capovolte, quindi risulta necessario inserire un erettore (costituito da due lenti convergenti) che ha il compito di raddrizzare l'immagine.

1.2.2 I telescopi riflettori

In tale tipologia di telescopio, anche detto Newtoniano, in quanto prende il nome dal suo inventore, l'obiettivo è costituito da specchi. Il principio di funzionamento è tale per cui, la luce entra nel tubo ottico, giunge in corrispondenza dello specchio principale (che può essere sferico o parabolico), viene riflessa ed inviata ad uno specchio piano di forma ellittica, inclinato di 45° e posto al centro del tubo. Lo specchio secondario impone al fascio di luce una deviazione di 90° in modo tale da farlo fuoriuscire dal tubo così da raggiungere l'oculare, pertanto, il suo scopo è quello di portare il fuoco in una posizione utile. Il principale vantaggio è dovuto all'utilizzo di specchi, e non di lenti, che fanno in modo che non si verifichi l'aberrazione cromatica, inoltre presentano un

rapporto di apertura variabile, di conseguenza godono di una elevata luminosità, che li rende perfetti per osservare oggetti deboli come nebulose, galassie e ammassi stellari. I riflettori Newtoniani garantiscono una buona nitidezza delle immagini ma, il basso contrasto non permette di avere colori brillanti, inoltre, il principale problema è che il tubo è molto lungo e può vibrare sotto l'azione del vento.

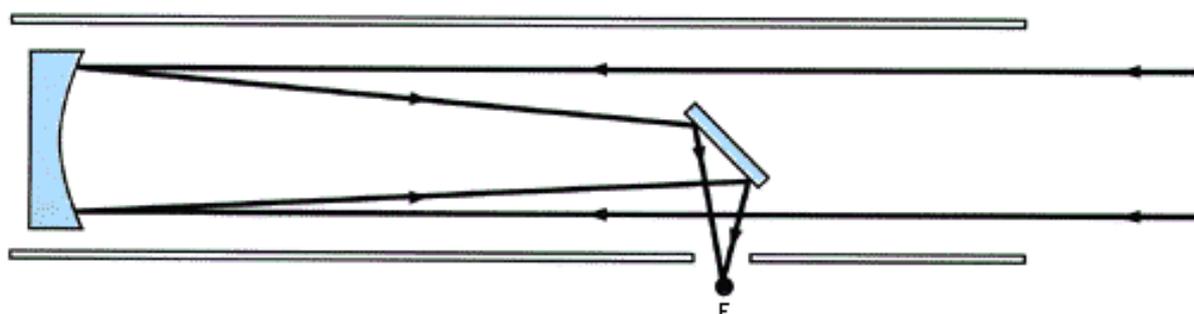


Figura 7. Schema di un riflettore Newtoniano

1.2.3 I telescopi Catadiottrici Cassegrain

Questa tipologia ibrida presenta una combinazione di specchi e lenti che permettono di manipolare i raggi luminosi. I vantaggi principali consistono in una riduzione netta di ingombri e pesi. A questa categoria appartengono i Maksutov-Cassegrain e gli Schmidt-Cassegrain. Questi ultimi, per correggere l'aberrazione sferica, sfruttano una lastra correttiva di vetro, estremamente sottile e di forma asferica, che viene adattata alla forma dello specchio primario concavo. Lo specchio secondario convesso viene inserito all'interno di una lastra correttiva, posta all'inizio del tubo. La lente ha potere convergente al centro e divergente ai bordi, ma siccome non modifica la focale complessiva e serve solo a correggere le aberrazioni ottiche, è detta lastra. La luce attraversa la lastra correttiva, arriva allo specchio primario che la riflette allo specchio secondario e, in definitiva, attraversa il foro al centro dello specchio primario, giungendo all'oculare. Il gioco di specchi consente di ridurre gli ingombri, ottenendo, inoltre, una buona nitidezza dell'immagine. Il

tubo in questa configurazione risulta chiuso, ed il telescopio, conseguentemente, è estremamente versatile.

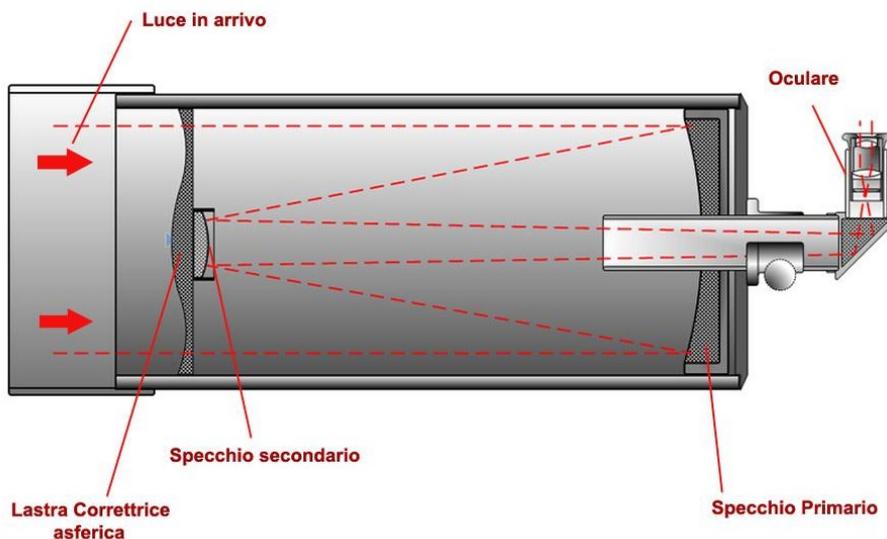


Figura 8. Schema di un telescopio Schmidt-Cassegrain

I telescopi Maksutov-Cassegrain sono simili ai precedenti, ma sono molto più facili da realizzare. Sono dotati di uno specchio sferico e di una lastra concava, ovvero una lente a menisco, sulla cui superficie interna è ricavato, per alluminatura, lo specchio secondario. Le lenti sono classificate in base alla curvatura della superficie e nel caso concavo-convessa, se le due superfici hanno lo stesso raggio, la lente è detta menisco. La luce, attraverso la lastra, colpisce lo specchio primario e viene riflessa verso lo spot alluminato all'interno del menisco, per poi in definitiva essere inviata verso il fuoco. In alcune varianti, al posto dello spot, viene inserito uno specchio alluminato convesso.

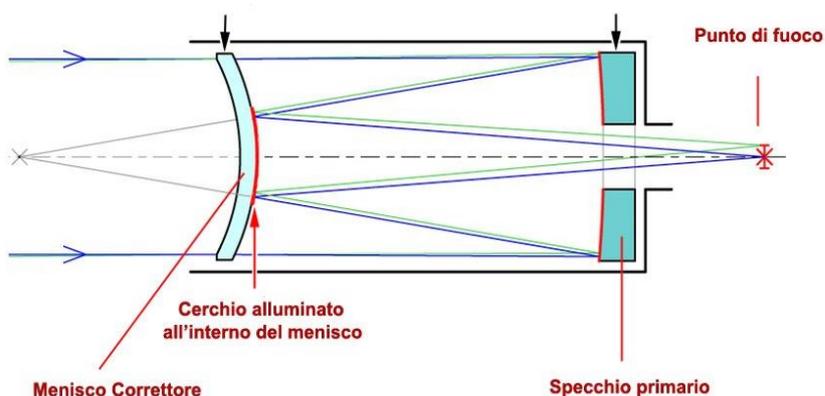


Figura 9. Schema di un telescopio Maksutov-Cassegrain

1.2.4 Altre tipologie di telescopi

Dei telescopi precedentemente presentati ne esistono numerose varianti, tra queste ricordiamo il telescopio Ritchey-Chrétien, la cui configurazione è Cassegrain, ma con la particolarità che gli specchi, primario e secondario, hanno una sezione iperbolica. È un telescopio di tipo aplanatico, quindi non è soggetto ad aberrazioni sferiche e di coma. Quest'ultima è detta "di coma", dato che le immagini ottenute presentano un aspetto a cometa, ovvero l'oggetto ripreso risulta spostato lateralmente di un angolo ϑ , rispetto all'asse del sistema. Tale schema ottico è caratterizzato da rapporti focali piccoli e quindi da una luminosità elevata. Inoltre tale sistema consente di garantire un'elevata compattezza dello strumento, giacché il tubo ottico può avere una lunghezza al massimo pari alla metà della lunghezza focale. Per dimensioni maggiori è necessaria la configurazione Maksutov-Cassegrain.

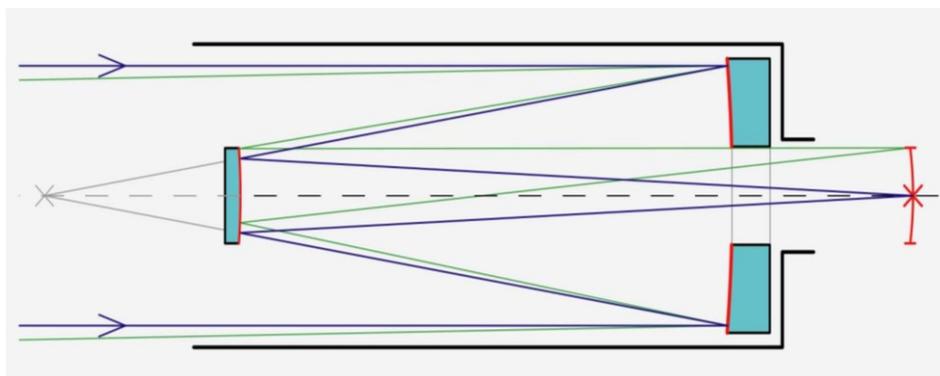


Figura 10. Schema di un telescopio Ritchey-Chrétien

Un'ulteriore tipologia di telescopio è il Gregoriano, il quale è costituito da uno specchio primario parabolico e da un secondario concavo a sezione ellittica, situato sull'asse ottico.

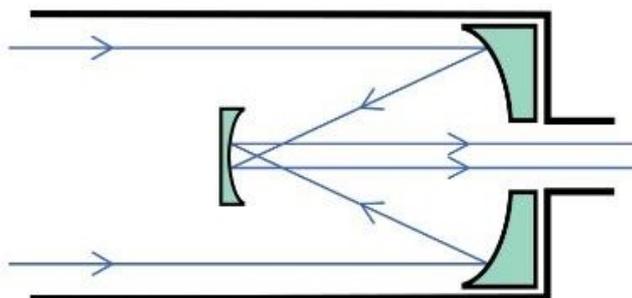


Figura 11. Schema di un telescopio Gregoriano

Come nel caso del Cassegrain, l'immagine si forma al di là dello specchio primario e non risulta ribaltata; di conseguenza lo strumento non necessita dell'ausilio di un erettore. Attualmente tale schema è utilizzato nei radiotelescopi.

Il telescopio Schmidt, da cui deriva lo Schmidt-Cassegrain, è uno strumento puramente fotografico, composto da uno specchio sferico e da una lente correttrice che funge anche da diaframma; quest'ultimo è un meccanismo a lamelle, che permette di regolare la quantità di luce che attraversa l'obiettivo. L'immagine si forma tra lo specchio e la lente e viene raccolta dalla pellicola, inoltre trova largo impiego nell'ambito della fotografia a grande campo. Infine esistono altre due varianti della configurazione **Cassegrain**, ovvero la configurazione **Nasmyth** e **Coudé**.

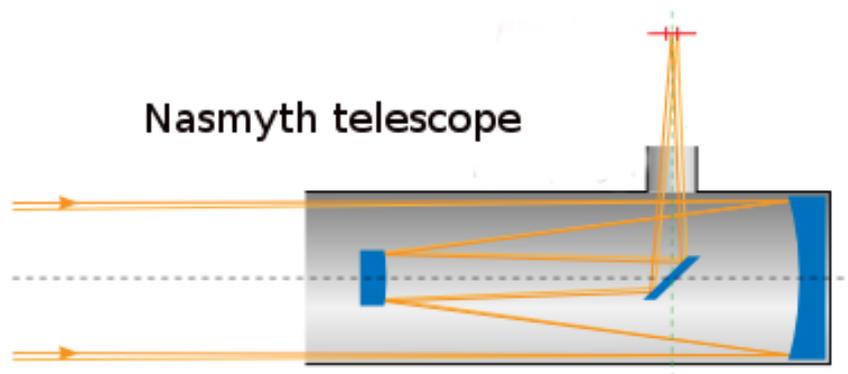


Figura 12. Configurazione Nasmyth

La configurazione Nasmyth presenta un terzo specchio piano, posto dietro il secondario iperbolico, che devia il fascio luminoso all'interno dell'asse. La configurazione Coudé sfrutta un quarto specchio per far passare la luce anche attraverso il secondo asse del telescopio, permettendo, quindi, di spostare il fuoco in un punto che resta immobile anche se il telescopio viene orientato diversamente. Entrambe le configurazioni forniscono lunghezze focali pari, se non maggiori, a quelle del Cassegrain e sono utilizzate per ottenere forti ingrandimenti. La configurazione Nasmyth permette all'osservatore, inoltre, di restare nella stessa posizione al variare della zona puntata dallo strumento.

1.3 La montatura dei telescopi

La montatura è la principale struttura di supporto di un telescopio, ed è utilizzata solo per le osservazioni da Terra. È importante che garantisca stabilità al fine di rendere performante e affidabile lo strumento, dato che è fondamentale assicurare un'elevata precisione di puntamento. La rigidità e la stabilità della montatura sono necessarie soprattutto quando si fa uso dei sistemi di ottica attiva e adattiva, che altrimenti risulterebbero inefficaci. Lo scopo principale è quello di mantenere le ottiche allineate, soprattutto quando si segue il movimento degli astri, permettendo così di orientare il telescopio nella direzione voluta. Proprio per questo motivo le montature consentono il movimento attorno a due assi tra loro perpendicolari e si suddividono in due categorie: **equatoriali** e **altazimutali**.

1.3.1 Montatura equatoriale

Tale tipologia di struttura permette, tramite un unico movimento, di inseguire il moto apparente di un astro nel cielo, ruotando in sincronia con il moto di rotazione terrestre. La montatura equatoriale permette di ruotare il telescopio attorno a due assi:

- **asse polare**, anche detto di ascensione retta, il quale risulta inclinato rispetto alla verticale del luogo, punta verso il Polo Nord celeste ed è parallelo all'asse di rotazione della Terra;
- **l'asse di declinazione**, il quale è ortogonale all'asse polare.

Effettuando un movimento uniforme attorno all'asse polare è possibile compensare il movimento di rotazione della Terra e quindi inseguire i corpi celesti durante il loro moto, sfruttando un motore elettrico che imprime una velocità costante. Una montatura di questo tipo permette di mantenere inquadrato un oggetto agendo su un solo asse, ma allo stesso tempo, è adatta alla sola latitudine per la quale viene realizzata.

Le montature equatoriali sono di due tipi: a forcella e alla tedesca. Quella a forcella è utilizzabile solo negli strumenti con ingombri limitati, ovvero costituiti da un tubo ottico particolarmente corto, come nel caso dei Cassegrain o degli Schmidt-Cassegrain, invece la montatura alla tedesca è adatta per tutte le tipologie di telescopio e necessita di appositi contrappesi che possano bilanciare il peso del telescopio e degli accessori.

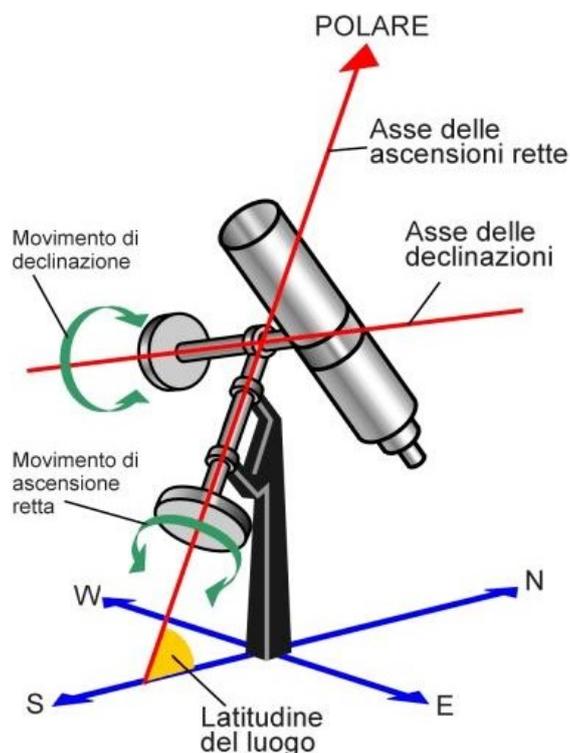


Figura 13. Schema di montatura equatoriale di un telescopio

È bene tener conto che un tubo più lungo è più difficile da sostenere in modo stabile, inoltre la montatura alla tedesca presenta un inconveniente, ovvero quando il corpo celeste osservato supera il meridiano dell'osservatore, occorre riposizionare il telescopio invertendo la posizione telescopio-contrappesi. Per seguire il corpo celeste in oggetto, il telescopio può essere orientato a mano, muovendo l'asse di ascensione retta con una manopola, oppure automaticamente con un motorino. Attualmente esistono sistemi elettronici computerizzati che non necessitano dell'operatore.

1.3.2 Montatura altazimutale

È una montatura particolarmente semplice costituita da due assi che permettono il movimento del telescopio in altezza e in azimut, ovvero perpendicolarmente e parallelamente all'orizzonte. Può essere un sistema motorizzato o manuale, ma a differenza dell'equatoriale, è necessario movimentare entrambi gli assi simultaneamente e dato che i movimenti rotazionali non avvengono più a velocità costante, gli assi del telescopio devono essere pilotati da calcolatori che generano delle leggi di movimento.

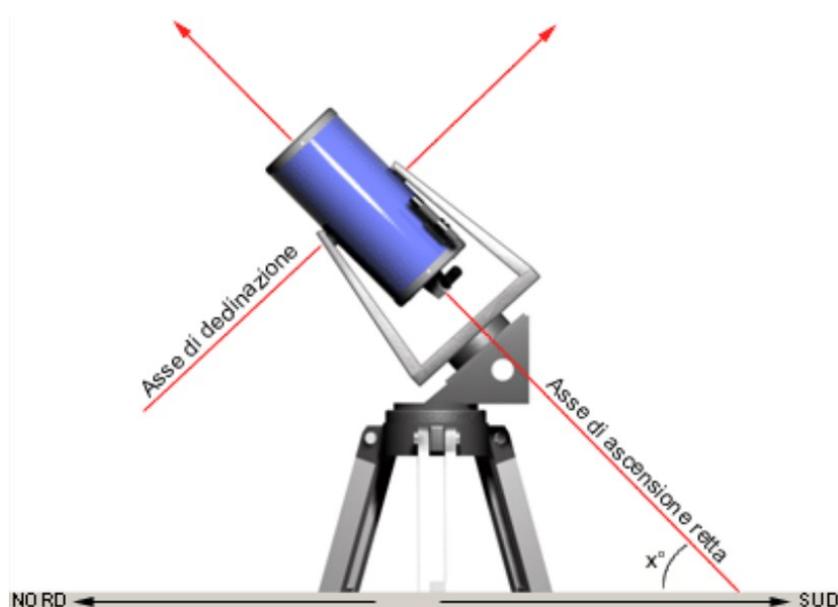


Figura 14. Schema di montatura altazimutale di un telescopio

La struttura risulta complessivamente più leggera, dato che non è necessaria una montatura che permetta di mantenere fissata l'inclinazione del telescopio. Quando il diametro dell'obiettivo supera i 6 metri, quindi per telescopi di grandi dimensioni, si utilizza una montatura altazimutale, essendo più economica e meno problematica in termini realizzativi. Inoltre i telescopi con montatura equatoriale sfruttano una serie di specchi, i quali muovendosi fanno convergere la luce su un punto fisso della montatura, il cosiddetto fuoco Coudé, invece nelle montature altazimutali le attrezzature per l'osservazione sono fissate e vengono fatte ruotare in azimut assieme al telescopio e in tal caso il fuoco è detto fuoco Nasmyth.

2. IL CONTESTO INTERNAZIONALE: ELT PROJECT

A coordinare la fase di sviluppo e di realizzazione dell'ELT è l'**European Southern Observatory (ESO)**, che si avvale, altresì, della collaborazione di numerosi consorzi di ricerca e partner industriali. L'ELT è un rivoluzionario telescopio terrestre che avrà uno “specchio principale” (segmentato) con un diametro di 39 metri e sarà *“il più grande occhio del mondo rivolto verso il cielo”*. Tale telescopio opererà nell'ottico e nel vicino infrarosso e sarà installato sul Cerro Armazones, nel deserto di Atacama, a 20 chilometri di distanza dal Cerro Paranal, dove si trova il Very Large Telescope (VLT). Sarà in grado di raccogliere tredici volte più luce dei più grandi telescopi attualmente esistenti, e permetterà, inoltre, di ottenere immagini significativamente più nitide, riducendo la distorsione dovuta alla turbolenza atmosferica.

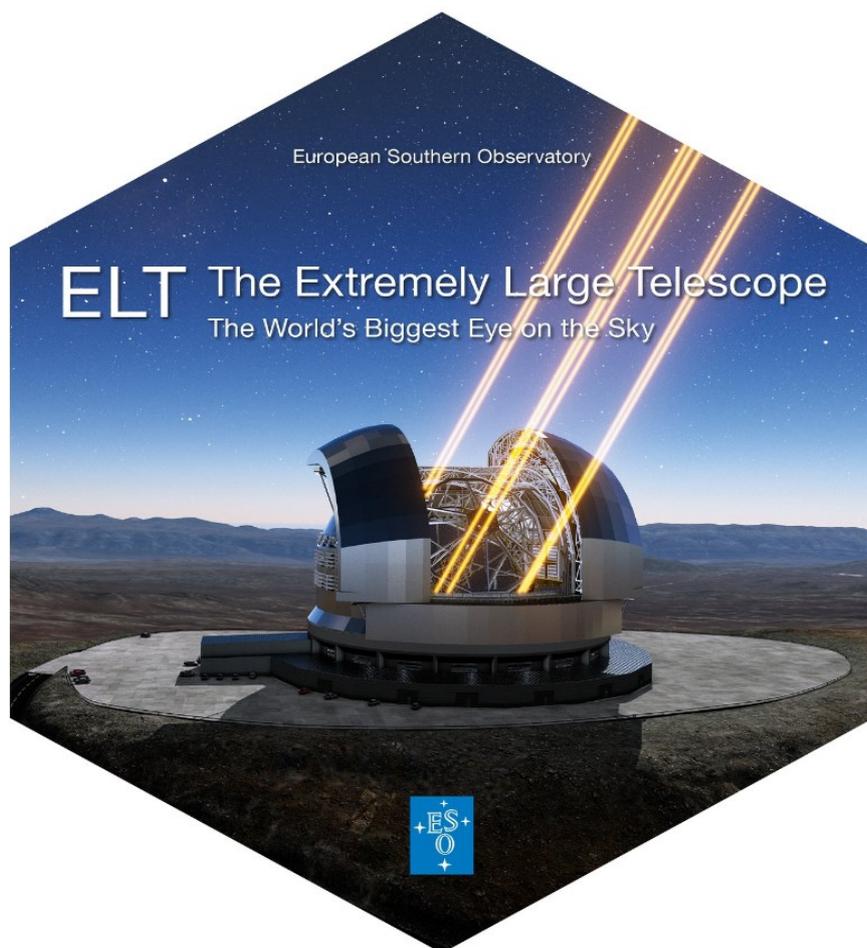


Figura 15. Rappresentazione di ELT

2.1 ESO - European Southern Observatory

L'ESO rappresenta la principale organizzazione inter-governativa di scienza e tecnologia in ambito astronomico. Promuove un programma ambizioso per la progettazione, la costruzione e l'utilizzo delle strutture per l'osservazione da terra più potenti e produttive al mondo. Il quartier generale dell'ESO è a Garching, vicino Monaco di Baviera, in Germania, e rappresenta il centro scientifico, tecnico ed amministrativo dell'ESO. In questa sede sono immagazzinati anche tutti i dati che arrivano dai vari siti osservativi della strumentazione scientifica ESO.



Figura 16. ESO quartier generale

A questo scopo, ESO integra il proprio know-how grazie a frequenti collaborazioni con la comunità scientifica e tecnologica internazionale, nonché, avvalendosi della consulenza dell'industria di settore coinvolge diversi players in tutto il mondo. Le attività scientifiche sono sostenute grazie ai contributi degli stati membri, quali: Austria, Belgio, Brasile, Danimarca, Finlandia, Francia, Germania, Gran Bretagna, Italia, Paesi Bassi, Polonia, Portogallo, Repubblica Ceca, Spagna, Svezia e Svizzera, insieme al Cile (il paese che ospita i maggiori siti osservativi).

I tre siti osservativi di primo ordine nel deserto di Atacama in Cile sono: La Silla, Paranal e Chajnantor. La Silla rappresenta il primo sito dell'ESO, una vetta di 2400 metri, circa 600 chilometri a nord da Santiago del Cile. Possiede uno dei cieli notturni più bui della Terra, è situato lontano da sorgenti d'inquinamento luminoso, ed appartiene all'ESO sin dagli anni '60. Il sito ospita numerosi telescopi ottici, tra cui il New Technology Telescope (NTT), il quale fu il primo ad essere dotato di uno specchio principale controllato da computer e uno spettrografo di elevatissima precisione, HARPS, il cui principale obiettivo è rivolto alla scoperta di pianeti extrasolari.

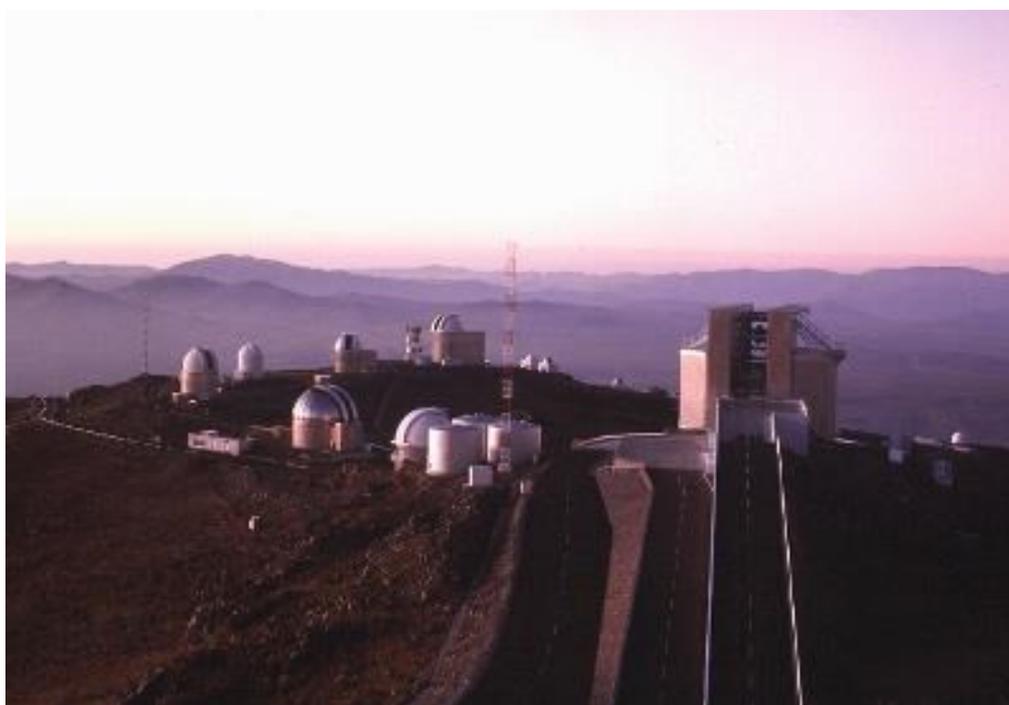


Figura 17. NTT - New Technology Telescope

Il secondo sito osservativo appartenente all'ESO è situato sull'altopiano di Chajnantor, sulle Ande cilene, dove in collaborazione con i partner internazionali, gestisce Atacama Large Millimeter/submillimeter Array (ALMA). ALMA comprende 66 antenne ad alta precisione, distribuite su distanze fino a 16 chilometri. Questa collaborazione globale è il più grande progetto astronomico che permette di studiare le *onde radio* provenienti da alcuni dei più freddi oggetti dell'Universo.



Figura 18. ALMA

Un altro sito osservativo dell'ESO è **Paranal** situato a 2635 metri dal livello del mare nel deserto di Atacama, in Cile; rappresenta uno dei migliori siti di osservazione astronomica al mondo. Ospita diversi telescopi come il VLT, il Visible and Infrared Survey Telescope per l'astronomia e il VLT Survey Telescope. Il Very Large Telescope è lo strumento ottico più avanzato al mondo, composto da quattro telescopi principali con specchi primari da **8.2 metri** di diametro e da quattro telescopi ausiliari mobili di 1.8 metri di diametro. I telescopi combinati fra di loro danno la possibilità agli astronomi di formare un interferometro gigante, il **Very Large Telescope Interferometer** dell'ESO (VLTI), con la possibilità di vedere dei dettagli che sono 25 volte superiori rispetto alle osservazioni fatte con telescopi singoli. I fasci vengono combinati grazie ad un sistema complesso di specchi in tunnel sotterranei in cui i percorsi del segnale luminoso devono essere mantenuti uguali a meno di 1/1000 mm lungo un percorso di oltre cento chilometri. Con tale precisione il VLTI permette la ricostruzione di immagini con una risoluzione angolare del millesimo di arcsec, che equivale a distinguere i fari di una macchina alla distanza della Luna dalla Terra. I telescopi possono essere anche utilizzati singolarmente. Telescopi di tali dimensioni permettono di ottenere immagini di corpi celesti fino a magnitudine² 30 con un'esposizione di un'ora. Corrisponde a

² **Magnitudine:** misura della luminosità, apparente o assoluta, di un corpo celeste.

vedere oggetti che sono quattro miliardi di volte meno luminosi di quelli che possono essere visti ad occhi nudo. La sfida tecnologica successiva a VLT è proprio quella di costruire l'**Extremely Large optical/infrared Telescope**. Il telescopio sarà installato in Cile, nella parte centrale del deserto di Atacama sul Cerro Armazones, a circa 20 Km di distanza dal complesso ESO del VLT.

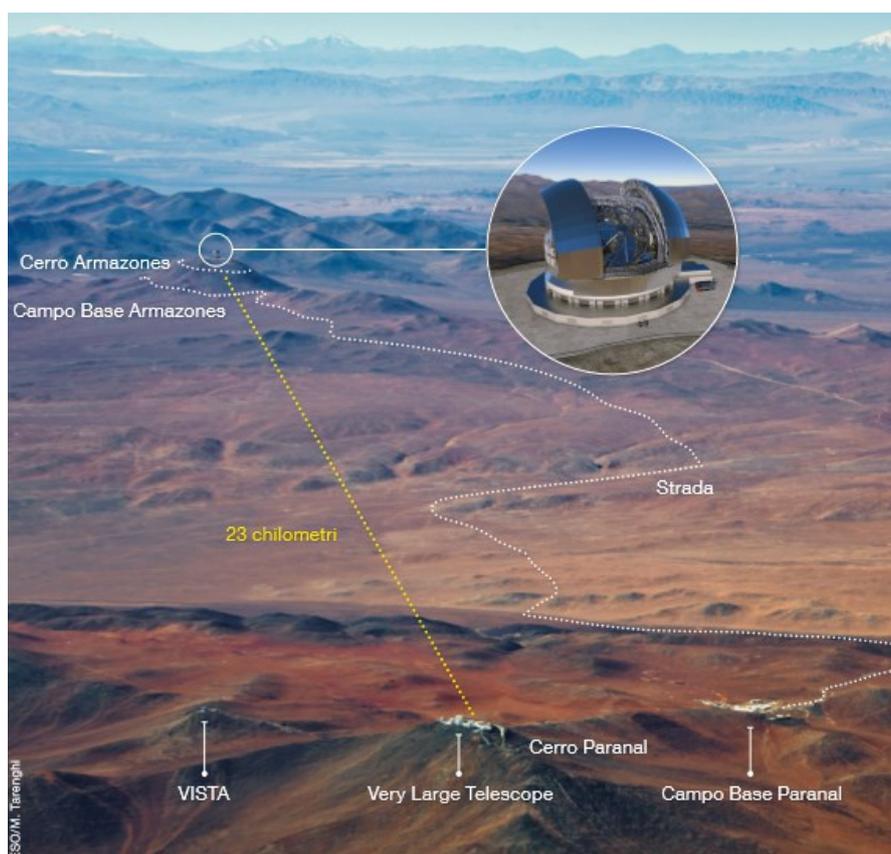


Figura 19. Cile settentrionale. Sito Paranal - Cerro Armazones

2.1.1 Le principali scoperte dell'ESO

Sono numerose le scoperte astronomiche riconducibili alla strumentazione ESO e di seguito sono riportate soltanto le più importanti.

- Gli studi fatti tramite il VLT hanno permesso di validare la teoria della relatività generale di Einstein, in relazione alla gravità in prossimità del buco nero super-massiccio Sagittarius A*, il quale si trova al centro della Via Lattea. È stato possibile dimostrare tale teoria tramite il comportamento di una stella che orbita attorno al buco nero [153];



- Gli scienziati hanno studiato rare esplosioni stellari, durante le quali viene rilasciata una grande quantità di energia. In tal modo, si resero conto che le supernove più lontane risultavano troppo deboli e ciò è dovuto al fatto che le distanze sono aumentate, discostandosi dai valori che avrebbero assunto se la velocità di espansione dell'universo non fosse mutata, conducendo alla teoria secondo la quale l'espansione dell'universo sta accelerando [118];
- È stato scoperto un pianeta che orbita attorno alla stella più vicina al Sistema Solare, ovvero Proxima Centauri. Tale pianeta probabilmente risulta abitabile, in quanto ha una temperatura adatta all'esistenza dell'acqua allo stato liquido;
- Gli astronomi hanno catturato la prima immagine di un buco nero e della sua ombra;
- ALMA ha rivelato numerosi dettagli di un sistema solare che si sta formando;
- Tramite il VLT è stata catturata la prima immagine in assoluto di un pianeta al di fuori del nostro Sistema Solare;
- I telescopi dell'ESO hanno osservato la prima luce emessa da una sorgente di onde gravitazionali, dovuta alla fusione di due stelle di neutroni. Questo fenomeno provoca la dispersione, nell'universo, di elementi pesanti come l'oro e il platino;
- È stata studiata l'atmosfera attorno ad un pianeta extrasolare, la quale è costituita principalmente da acqua sotto forma di vapore;
- Il VLT ha rilevato molecole di monossido di carbonio in una galassia situata a circa 11 miliardi di anni luce di distanza, permettendo così di misurare la temperatura cosmica in un'epoca così remota;
- È stato trovato un sistema di sette pianeti delle dimensioni della Terra [128].

2.2 INAF: Istituto Nazionale di Astrofisica

L'INAF, Istituto Nazionale di Astrofisica, è il principale Ente di Ricerca italiano per lo studio dell'universo. Ha un ruolo determinante a livello mondiale nello sviluppo e nella realizzazione di tutta la strumentazione ESO, favorendo così un continuo processo di trasferimento tecnologico, oltre ad un ritorno economico per il nostro Paese (in termini di commesse industriali). La ricerca astrofisica italiana ha conquistato durante gli ultimi 15 anni un ruolo di punta in questo settore, sia in ambito dei progetti da terra che nei progetti spaziali, raggiungendo così risultati ragguardevoli. È grazie al capitale umano di cui INAF si è dotata nel tempo, quasi **1600 persone** tra ricercatori, tecnologi, assegnisti, borsisti, dottorandi, tecnici e personale amministrativo che tali sfide possono essere perseguite. Sono **19 le strutture di ricerca** distribuite sul territorio nazionale ed una alle Isole Canarie che opera il Telescopio Nazionale Galileo (facility INAF).



Figura 20. Logo e sedi INAF in Italia (OACN in evidenza)



Figura 21. INAF – Osservatorio Astronomico di Capodimonte

Le attività di ricerca svolte presso l'**Osservatorio Astronomico di Capodimonte (INAF-OACN)** sono: lo studio del Sole, i corpi del Sistema Solare, delle stelle, del mezzo interstellare e delle galassie, la cosmologia, *lo sviluppo di tecnologie innovative per le osservazioni da terra* e misure nello spazio. L'INAF-OACN partecipa a progetti di interesse nazionale, come il Telescopio Nazionale Galileo (TNG), installato alle Isole Canarie; ha avuto e possiede attualmente, la diretta responsabilità nella realizzazione di telescopi nazionali ed internazionali, come il VLT dell'ESO. L'Italia, come sistema paese, enti di ricerca più industrie, risulta essere parte attiva nella costruzione del super telescopio ELT. Uno dei contratti assegnati prevede la progettazione, la realizzazione, il trasporto, la costruzione, l'assemblaggio sul sito e la verifica finale della cupola e della struttura del telescopio ELT. Inoltre, proprio l'ESO nel 2015 ha scelto di affidare all'INAF un prestigiosissimo incarico riguardante la progettazione e la realizzazione di **MAORY/MORFEO** (il nome del progetto è cambiato in MORFEO nell'agosto del 2022). **MORFEO** è un modulo di ottica adattiva multi-coniugata per ELT pensato per la compensazione, in tempo reale, degli effetti di degradazione dell'immagine causati dalla turbolenza atmosferica e dell'azione del vento sulla struttura del telescopio.

2.3 L'Extremely Large Telescope

L'astronomia sta vivendo un periodo ricco di scoperte, che potrebbero rivoluzionare la percezione che l'uomo ha dell'universo; proprio in questo contesto viene concepito l'ELT. Il telescopio sarà basato su un complesso schema ottico a cinque specchi e sarà equipaggiato con diversi strumenti scientifici. L'ELT sarà in grado di rispondere a domande irrisolte nell'astronomia "raccolgendo" 13 volte più luce rispetto ai telescopi ottici esistenti. Sarà in grado di correggere sin dall'inizio le distorsioni atmosferiche tramite il modulo di ottica adattiva (**MORFEO**), riuscendo a fornire delle immagini che sono 16 volte più nitide rispetto a quelle del telescopio spaziale Hubble. La struttura del telescopio, di tipo altazimutale, sarà in grado di supportare lo specchio primario, concavo e segmentato, di 39 metri di diametro, garantendo un'elevatissima stabilità e precisione, nonostante sia installato in una zona ad alta sismicità.

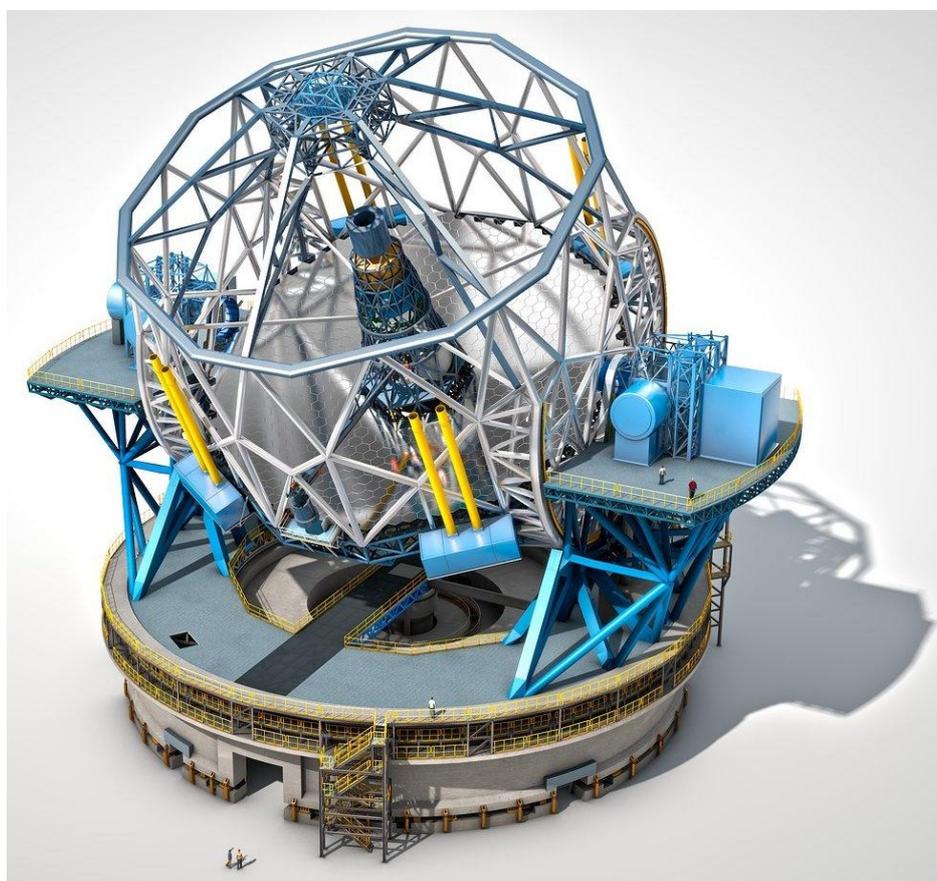


Figura 22. Main Structure di ELT - Extremely Large Telescope



2.3.1 ELT timeline e sito

Nel 1997 nacque l'idea di progettare un telescopio con singola apertura di **100 metri** di diametro, così da permettere progressi scientifici di grande rilievo. In realtà, già negli anni '70 si pensò di costruire un telescopio con un'apertura di 25 metri, ma a causa della difficile realizzabilità e dato che la tecnologia non era ancora sufficientemente all'avanguardia, restò solo un'idea. Successivamente si decise di ridurre le dimensioni del diametro del primario da 100 a 39 metri, a causa della complessità realizzativa, nonché, degli eccessivi costi di realizzazione. Tra l'altro, ad oggi, sarebbe impensabile riuscire ad applicare le tecniche di ottica adattiva ad un telescopio di tali dimensioni. Nel dicembre 2006, il Consiglio ESO ha autorizzato il progetto realizzativo dell'Extremely Large Telescope. Nell'aprile 2010, fu scelto il sito per l'ELT, dopo numerosi studi circa la stabilità atmosferica, la quantità di vapore acqueo e il numero di notti limpide. Il sito doveva necessariamente risultare elevato e secco, poi, volendo beneficiare della vicinanza all'Osservatorio di Paranal dell'ESO (per le sue facilities già esistenti), fu scelto il Cerro Armazones, un rilievo di 3046 metri, che gode di un'ottima qualità del cielo. Oltre che per i suoi cieli cristallini, il Cile è anche tristemente noto per i devastanti terremoti che si registrano, motivo per il quale l'ELT, dovrà essere isolato dal suolo con le più efficaci tecnologie antisismiche. Anche altri fattori come il costo della costruzione, la gestione delle operazioni, nonché la possibilità di interagire sinergicamente con le varie attività operative e scientifiche di altre strutture come VLT ed ALMA, hanno giustificato ulteriormente tale scelta strategica. Il 13 Ottobre 2011, l'ESO firmò un accordo con il Cile, che prevedeva la donazione di terreni per il telescopio e di un'area circostante destinata a proteggerlo dall'inquinamento luminoso, per un totale di circa **1270 km²**. Nel giugno 2012, il Consiglio si riunì a Garching per dare il via al programma ELT. Nel marzo 2014 iniziarono le opere civili per la predisposizione del sito del telescopio, ovvero, la realizzazione di una strada asfaltata che potesse congiungere la cima della montagna con

l'autostrada pubblica; il 19 giugno dello stesso anno, fu fatta saltare in aria parte della cima, durante una cerimonia inaugurale, in modo che potesse ospitare la piattaforma rotante e altre strutture di supporto.



Figura 23. Stato delle costruzioni dell'ELT in Cile nel 2019

Nel dicembre 2018 sono iniziati i lavori di costruzione per la cupola e la struttura principale del telescopio. L'attuale stato dell'arte del progetto è riportato in Figura 24 un'immagine estratta dalla webcam, posta sul Cerro Armazones, che riprende real time gli aggiornamenti del cantiere di ELT. È di particolare interesse osservare anche la qualità del cielo che si troverà di fronte ELT durante le sue notti osservative. La prima luce del telescopio è attualmente pianificata nel **2027**.

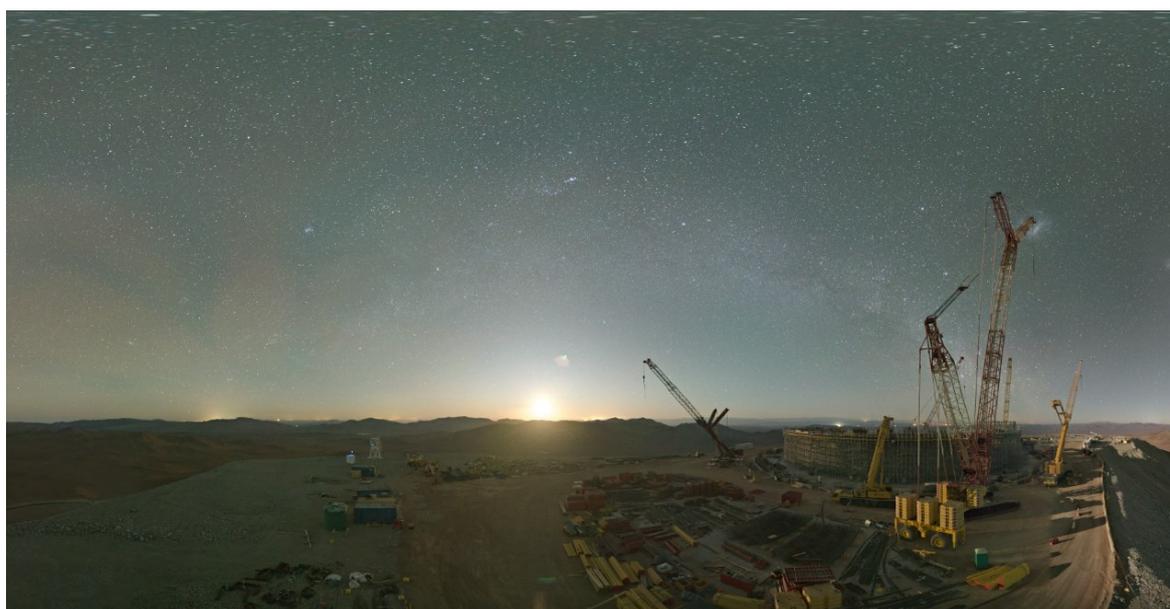


Figura 24. Webcam ELT – ottobre 2022

2.3.2 La struttura del telescopio

L'ELT è un telescopio altazimutale con uno specchio principale, segmentato in 798 elementi, da 39 metri di diametro. La struttura che accoglierà le ottiche del telescopio nonché i suoi strumenti scientifici è chiamata “**Main Structure**”, ed è divisa in tre parti principali:

- Le **fondazioni**, la parte centrale fissata al suolo, in cemento armato.
- L'**Azimuth Structure**, che ruota intorno all'asse verticale del telescopio;
- L'**Altitude Structure**, che ruota intorno all'asse orizzontale del telescopio.

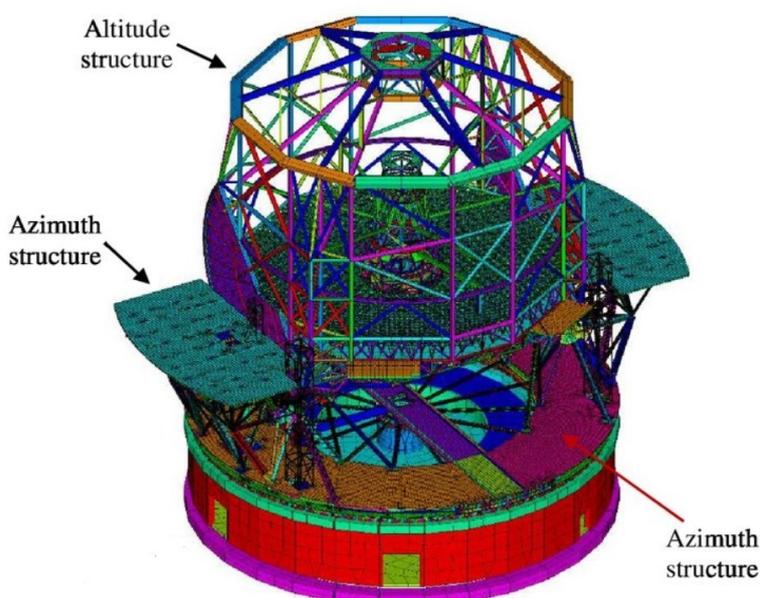


Figura 25. Main Structure di ELT

In termini generali, lo scopo di un telescopio è consentire al sistema ottico di puntare e localizzare i corpi celesti. A tale scopo, la struttura principale ha due compiti:

- **Fungere da supporto** per: componenti ottici, optomeccaniche e strumentazione, nel modo più rigido e preciso possibile. L'obiettivo è che tutti gli elementi non si discostino (entro un certo range) dalla loro posizione nominale e si consenta un puntamento preciso e stabile.
- **Spostare il telescopio e controllare i due movimenti** con elevata precisione, al fine di puntare correttamente l'oggetto desiderato.

Il telescopio è completamente orientabile, l'ottica è montata su una struttura altazimutale in acciaio del peso di circa **3700 tonnellate**, con due grandi culle che permettono movimentazioni in altezza ed in azimut. È stata studiata la deflessione cui è soggetta la struttura del telescopio in maniera tale da ottimizzare il sistema di cuscinetti idrostatici e favorire la movimentazione dovuta ai sistemi di azionamento e agli encoder. La struttura poggerà su un pilastro in cemento con un diametro di 52 metri che sarà completamente isolato dal suolo. Tale struttura sarà incardinata su una rotaia, sulla quale saranno disposti 54 carrelli e i relativi meccanismi di rotazione. Alcuni di questi carrelli risultano motorizzati, i restanti sono inerti e dotati di encoder che permettono di controllarne i movimenti. È garantita la rotazione attorno all'asse di Azimuth, in entrambe le direzioni ed è indipendente dai movimenti del telescopio. La rotazione attorno ai due assi è realizzabile grazie al sistema Direct Drive ed è possibile mantenere la posizione mediante encoder incrementali ad elevata precisione. Il progetto ELT consiste nel telescopio, individuato come struttura principale, o Main Structure, e nella cupola, detta Dome. La Main Structure, vista prima, comprende le optomeccaniche e gli strumenti ottici ed è divisa in tre parti: un pilastro di cemento fissato al suolo, l'Azimuth Structure, che ruota attorno ad un asse verticale e l'Altitude Structure, la quale ruota attorno ad un asse orizzontale.

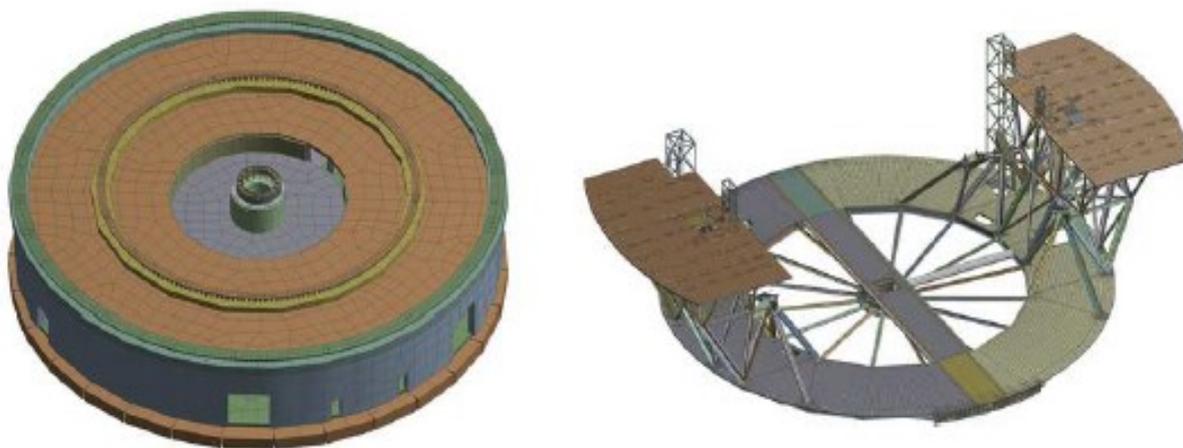


Figura 26. Telescopio ELT: fondazioni (a sinistra), Azimuth Structure (a destra)

La parte fissa presenta, tra le fondamenta ed il pilastro di cemento, una serie di dispositivi sismici che garantiscono un certo livello di isolamento. Il pilastro è costituito da tre pareti circolari con circonferenze di diametro rispettivamente pari a 52 metri, 34 metri e 6 metri, rinforzato da una lastra superiore, una inferiore e da sei pareti radiali. Sulla parte superiore sono presenti i tre binari, esterno, intermedio e interno, sui quali la struttura scorre, detti Azimuth tracks. Il binario esterno e quello intermedio non sono incastonati nel cemento, ma si trovano su dei supporti regolabili, invece il binario interno si trova sul cemento. L'*Azimuth Structure* ruota sulla parte fissa, grazie ai tre binari di Azimuth e sostiene l'Altitude Structure, la quale scorre su due binari detti altitude tracks. Per semplificare il rifornimento di energia e le operazioni di refrigerazione e lubrificazione, i cuscinetti, i freni, le teste dell'encoder e tutti gli altri elementi di supporto si trovano sulla struttura azimutale.

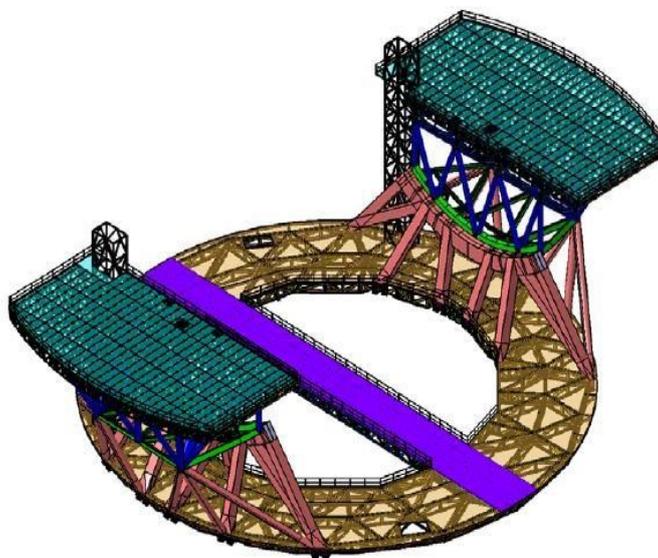


Figura 27. Azimut Structure

L'Azimuth Structure è costituita da cinque componenti principali: il pavimento che collega le due culle dell'Altitude Structure, garantendo una maggiore rigidità all'insieme; due supporti rigidi che, mediante dei cuscinetti radiali e laterali, vincolano l'Altitude Structure; due **piattaforme Nasmyth**, ciascuna grande quanto un campo da tennis, che supportano i vari strumenti scientifici e le Pre-Focal Station (PFS) del telescopio.

Il pavimento è largo 10 metri ed è costituito da un ponte che permette l'estrazione delle unità nell'ART (Adaptive Relay Tower) ed ospita, inoltre, quadri elettrici e apparecchiature ausiliarie. I supporti rigidi e le piattaforme Nasmyth sono collegati al pavimento mediante delle capriate che garantiscono un'estrema rigidità alla meccanica dell'ELT.

L'*Altitude Structure* ruota sulla struttura azimutale, scorrendo sui supporti rigidi. È costituita da numerosi componenti: i binari radiali e laterali; la struttura di supporto dello specchio M1; la cella M1 che supporta i 798 segmenti dello specchio principale; la struttura che collega la cella M1 a quella M2; la struttura che sorregge lo specchio M2; l'Adaptive Relay Tower (ART), che supporta gli specchi M3, M4, M5, le unità di calibrazione ed il condensatore a dispersione atmosferica (ADC); le piattaforme LGS, ovvero Laser Guide Stars. Inoltre sono presenti delle piattaforme pedonabili sotto ciascuno specchio, per effettuare le ispezioni e le attività di manutenzione.

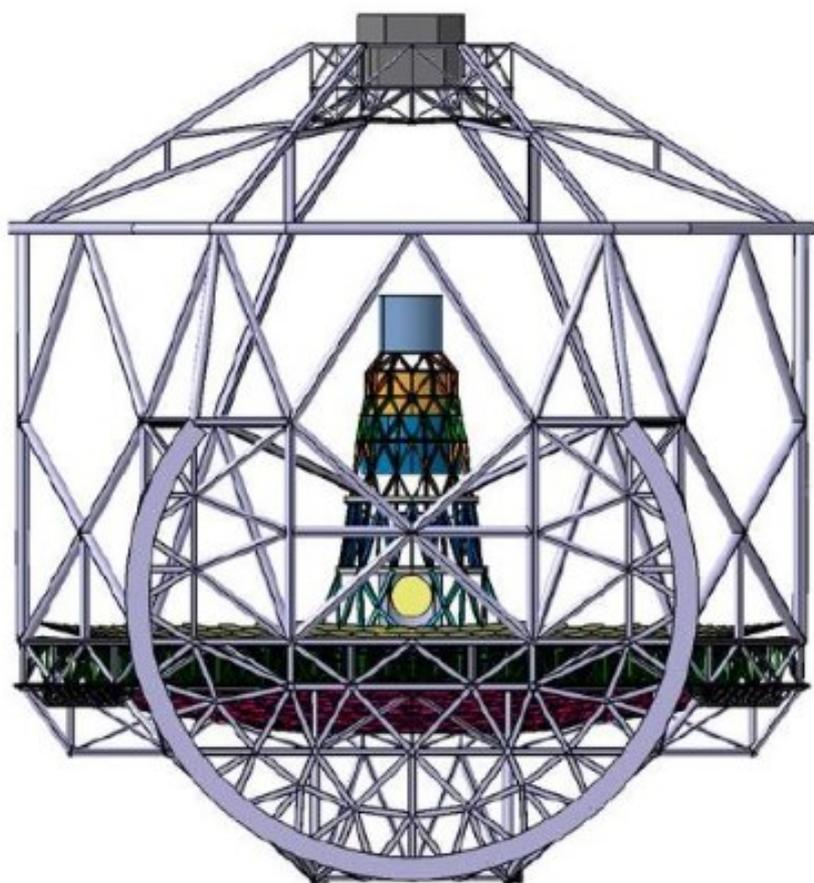


Figura 28. Altitude Structure

2.3.3 The Dome: la cupola dell'ELT

La struttura che protegge il telescopio prende il nome di cupola, ed è divisa in quattro quarti principali:

1. Una **base in calcestruzzo**, che costituisce la base della struttura rotante sovrastante.
2. Una **struttura rotante** che ha un duplice scopo: racchiudere e proteggere il telescopio. Presenta delle aperture, degli shutter, che permettono al telescopio di osservare il cielo e ruotano intorno all'asse di azimutale seguendo il movimento del telescopio.
3. **Dome Slit Doors (DSD)** ovvero le porte della struttura rotante che si aprono e si chiudono per consentire l'osservazione.
4. **Wind-screen**, composto da quattro pannelli in alluminio, è una struttura che si installa all'interno della cupola, in corrispondenza del DSD, che viene utilizzata durante l'osservazione. Si muove su e giù per proteggere il telescopio dal vento senza bloccare il fascio ottico al fine di ridurre le vibrazioni e le deflessioni indotte dal vento sul telescopio.

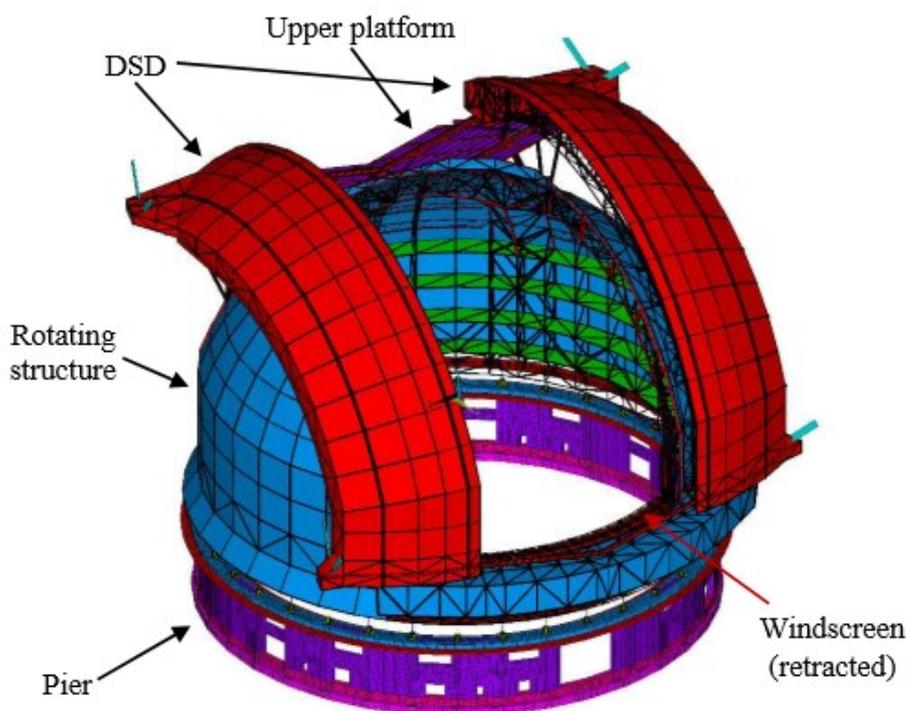


Figura 29. Vista 3D della cupola di ELT

In termini generali, lo scopo della cupola è quello di proteggere il telescopio dall'ambiente (sole, polvere, pioggia, neve, ghiaccio, vento, ecc.), di creare le migliori condizioni possibili per l'osservazione nonché di mantenere un'apertura libera e allineata con il telescopio per puntare il cielo. In questa ottica, i componenti chiave per la funzionalità della cupola sono i seguenti:

- Il sistema di apertura DSD, che permette di passare dalla configurazione di chiusura, fungendo da protezione, a quella di apertura per l'osservazione.
- Il rivestimento, il sistema di aggancio DSD e le guarnizioni per la protezione del telescopio contro l'ambiente.
- I carrelli della cupola e il sistema di movimentazione del wind-screen (carrelli, motori, catene, contrappesi e funi), che muovono la cupola e il wind-screen secondo il movimento del telescopio, mantenendo libero il fascio ottico per puntare e tracciare il cielo.
- Il sistema di controllo termico (di giorno), che controlla la temperatura del telescopio per mantenerla il più vicino possibile alla temperatura prevista per la notte successiva.
- Il wind-screen e le feritoie (di notte), che impediscono al vento di colpire direttamente il telescopio, garantendo allo stesso tempo un adeguato ricambio d'aria sugli specchi. Anche questo migliora molto la qualità dell'osservazione.

La **struttura rotante della cupola** è una struttura emisferica in acciaio, con un diametro di 86 metri ed un'altezza di 80 metri circa, composta da **tre livelli di tralicci**:

- Il primo livello, costituito dall'anello principale e dagli archi principali (Figura 30, a sinistra e al centro).
- Il secondo e terzo livello (Figura 30, a destra), che sostengono il rivestimento e le attrezzature di bordo. Questi livelli di tralicci comprendono la piattaforma superiore che ospita i binari DSD.



Figura 30. Struttura rotante

Le Dome Slit Doors (DSD) sono le porte che aprono la cupola permettendo al telescopio di puntare il cielo. Ogni porta scorre orizzontalmente lungo tre piste: una per il bordo inferiore del DSD, detta pista inferiore, due per il bordo superiore delle DSD, dette piste superiori.

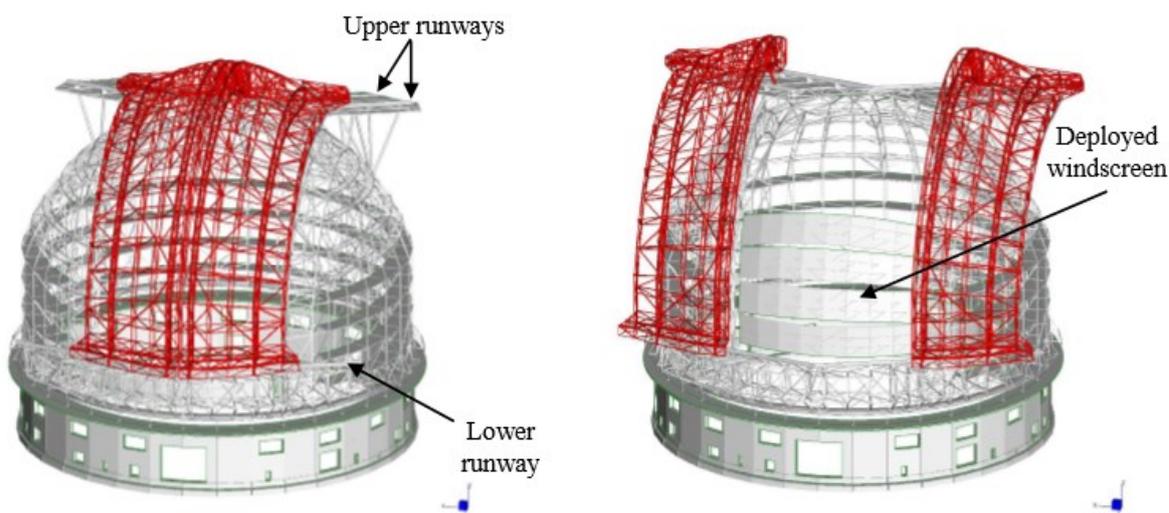


Figura 31. DSD

La Figura 31 mostra le DSD in configurazione chiusa ed aperta, con le piste superiori ed inferiori evidenziate. Quando sono chiuse le DSD sono sigillate da una guarnizione di tenuta. Nell'immagine precedente è evidenziato anche il wind-screen indispensabile per mitigare i carichi da vento sulla strumentazione scientifica Nasmyth di ELT.

2.3.4 Optical layout di ELT

L'ELT è dotato di un sistema ottico anastigmatico a tre specchi, che permette di ridurre al minimo le principali aberrazioni ottiche, ovvero aberrazione sferica, coma e astigmatismo³. Sono presenti, inoltre, anche due specchi che permettono di deviare il fascio in corrispondenza del fuoco Nasmyth, per un totale di cinque specchi montati sull'Altitude Structure.

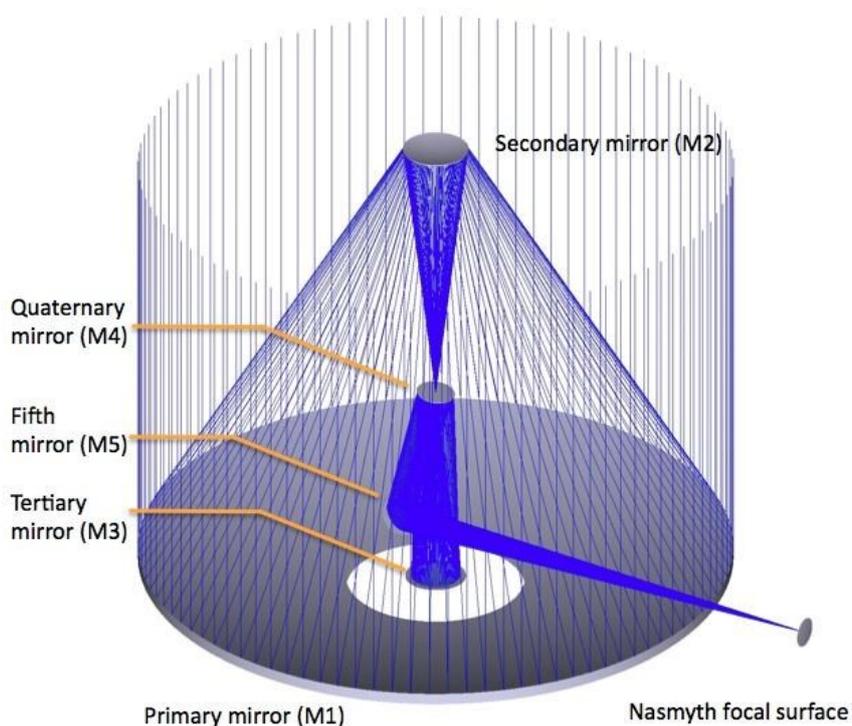


Figura 32. Configurazione Nasmyth

Lo specchio primario *M1*, è uno specchio concavo ed ellittico, con un diametro di 39 metri. È costituito da **798 segmenti** di forma esagonale, ognuno largo 1.45 metri, con uno spessore di soli 50 millimetri, posizionati tutti sulla medesima struttura di supporto e distanziati, tra loro, di 4 millimetri. Ciascun segmento sarà dotato di tre PACT, ovvero 3 attuatori di posizione, che faranno da supporto optomeccanico ai segmenti e ne controlleranno la posizione nelle tre direzioni, dette di *focus*, o fronte piano, *tip* e *tilt*.

³ **Astigmatismo**: i raggi che si propagano in due piani intersecanti l'asse ottico, ad angoli differenti, presentano fuochi differenti e proiettando l'immagine di un punto, questo risulterà deformato.

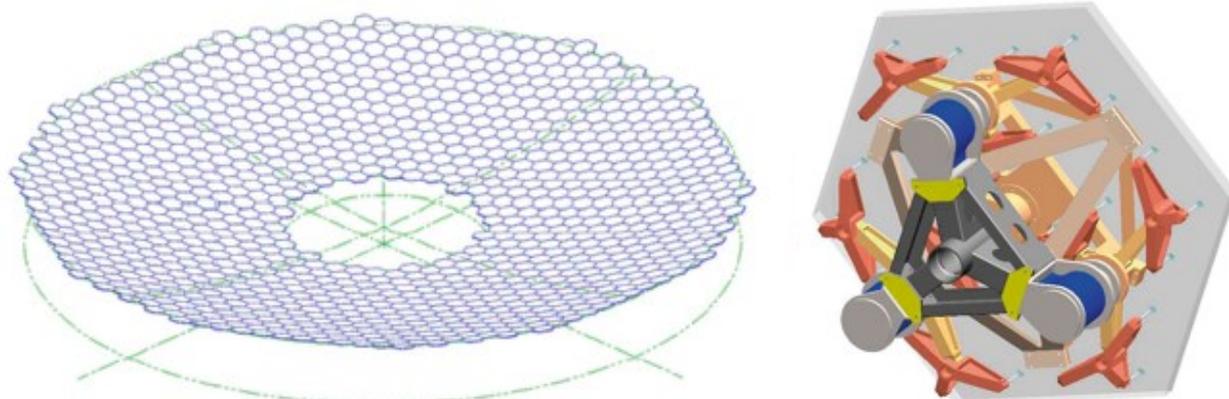


Figura 33. M1: Specchio primario di ELT (sinistra) e supporto optomeccanico dei 798 petali (destra)

Il sistema di controllo attuerà degli aggiustamenti che permetteranno di mantenere la forma nominale dello specchio, correggendo le deformazioni che potrebbero essere causate da variazioni di temperatura, dai carichi da vento o dai cambiamenti nell'elevazione del telescopio.

Lo specchio secondario **M2**, con un diametro di 4.2 metri, sarà il più grande specchio convesso mai prodotto, superando anche le dimensioni degli specchi primari dei telescopi situati a La Silla. Lo specchio convesso M2, si troverà a circa 60 metri dal suolo, rivolto a testa in giù, verso lo specchio primario M1 e vincolato alla struttura di supporto del telescopio. Il secondary mirror restituisce il fascio allo specchio **M3**, passando attraverso un foro nello specchio M4.

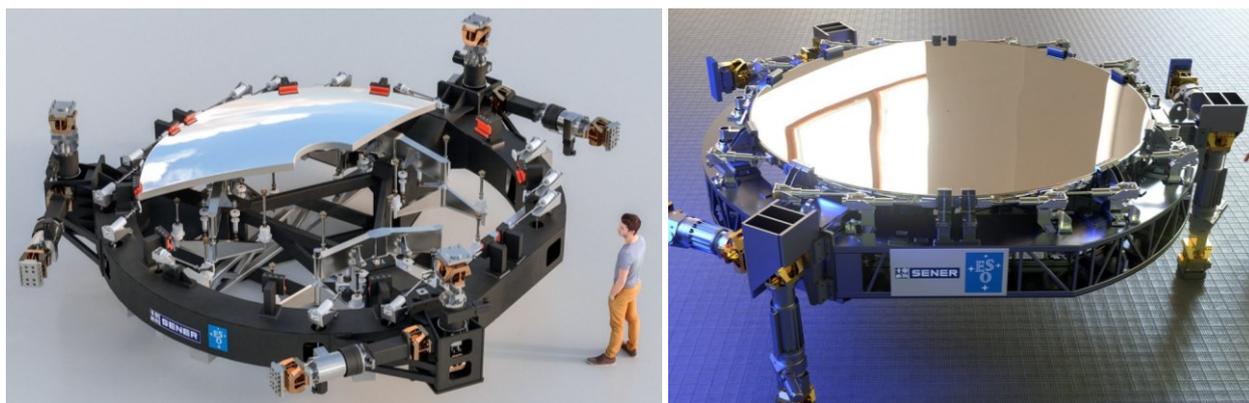


Figura 34. M2 Specchio secondario (sinistra) e M3 Specchio terziario (destra) di ELT

Il fascio ottico del main path di ELT viene riflesso da M3 *al sistema di ottica adattiva*, ovvero allo specchio **M4**. Lo specchio concavo M3 presenta un diametro di 4 metri e, così come lo specchio

secondario, è realizzato con un materiale in vetroceramica a bassa espansione, lo Zerodur, il quale è particolarmente resistente e presenta un coefficiente di espansione termica estremamente basso, in modo da ridurre le deformazioni termiche a cui saranno soggetti gli specchi. Lo specchio M3, così come M2 e M4 permettono la rifocalizzazione del fascio ottico di ELT.

M4 è uno **specchio adattivo** di 2.6 metri di diametro e di soli 2 mm di spessore, dotato di più di ottomila attuatori elettromagnetici che, modificheranno real-time la forma della superficie riflettente di questo elemento ottico.

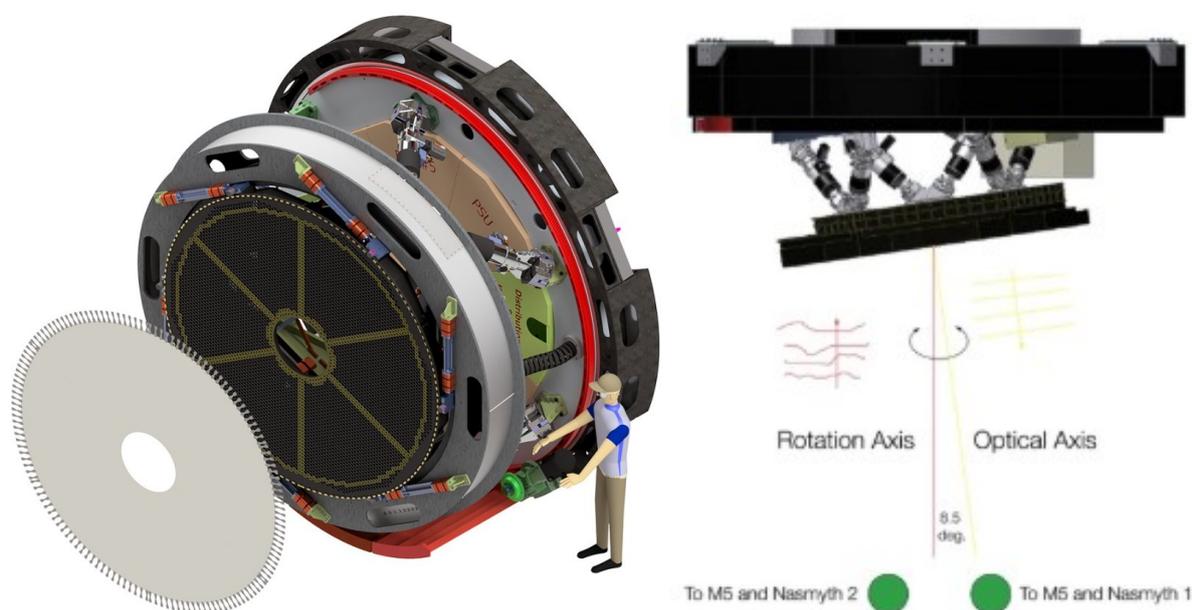


Figura 35. Schema optomeccanico di M4

M4 è inclinato di circa 8.5 gradi rispetto alla direzione del fascio ottico e permetterà di correggere in tempo reale gli errori del fronte d'onda, causati dalla distorsione atmosferica. Questo elemento ottico "adattivo" di ELT in sinergia con il modulo di ottica adattiva **MORFEO** rappresenterà una nuova frontiera tecnologica che detterà le linee guida per i telescopi ground-based dei prossimi decenni. Lungo il percorso ottico, si trova **M5**, infine, uno specchio piatto ed ellittico con dimensioni di 2.70 x 2.20 metri, il cui compito è quello di stabilizzare eventuali movimenti delle immagini, indotti dalle vibrazioni causate dall'atmosfera, dal vento o da altri fattori esterni. M5,

uno specchio ultraleggero, può muoversi (foldare il fascio) a destra e sinistra per inviare il fascio alla piattaforma Nasmyth A o B. Inoltre è possibile reindirizzare il fascio anche al fuoco Coudé, situato al di sotto del telescopio, al livello del suolo. Il fuoco Coudé permetterà di sfruttare uno spettrografo ultra stabile ad alta risoluzione, offrendo all'ELT la possibilità di effettuare ulteriori nuove scoperte, ottimizzando, nel migliore dei modi, la luce raccolta da M1.

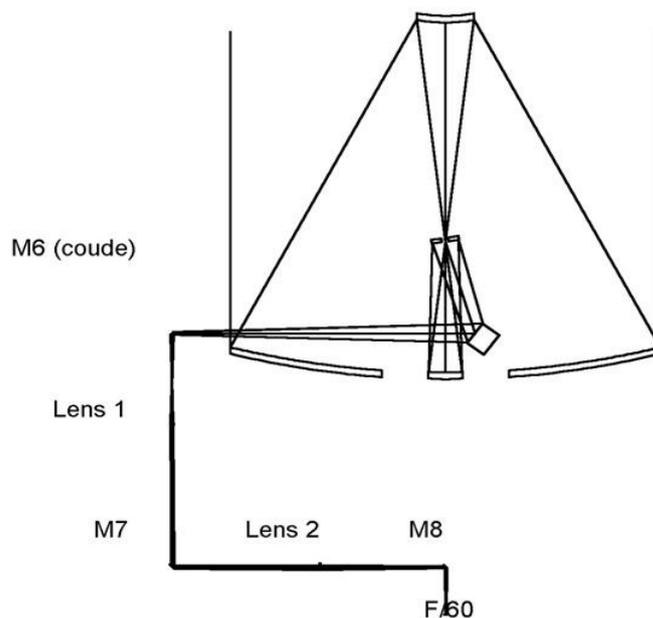


Figura 36. Configurazione Coudé di ELT

2.3.5 Gli strumenti di ELT

L'ELT sarà dotato di strumenti di altissimo livello dalle performance tecnologiche e scientifiche mai realizzate prima d'ora. Gli strumenti Nasmyth, ovvero quelli posti sulle 2 piattaforme Nasmyth A e B, che equipaggeranno il telescopio saranno rispettivamente:

- **HARMONI**, High Angular Resolution Monolithic Optical and Near-infrared Integral field spectrograph
- **ANDES** (prima **HIRES**), ArmazoNes high Dispersion Echelle Spectrograph
- **MORFEO** (prima **MAORY**), Multi-conjugate adaptive Optics Relay For ELT Observations
- **METIS**, Mid-infrared ELT Imager and Spectrograph
- **MICADO**, Multi-AO Imaging Camera for Deep Observations

- **MOSAIC**, Multi-Object Spectrograph

HARMONI, lo spettrografo monolitico a campo integrale ad alta risoluzione angolare nell'ottico e nel vicino infrarosso, è uno degli strumenti di prima luce dell'ELT. Sarà utilizzato per caratterizzare gli esopianeti e per esplorare le galassie, operando nelle lunghezze d'onda comprese tra 0.47 e 2.45 μm , permetterà di ottimizzare le osservazioni, sfruttando la migliore qualità delle immagini fornita da un modulo di ottica adattiva tomografica laser post-focale. Il suo funzionamento si basa sul principio "inquadra e scatta", infatti sarà molto facile da calibrare e utilizzare. Permetterà di esplorare le galassie nell'Universo primordiale e caratterizzare gli esopianeti, simili alla Terra.

ANDES è uno strumento del quale la fase A risulta essere stata completata ed è attualmente in attesa dello start per la fase B. Lo strumento proposto combina un'alta risoluzione e un'ampia gamma spettrale con l'enorme superficie dell'ELT per produrre dati con un rumore o un segnale eccessivi molto bassi. Ciò consentirà ad ANDES di studiare oggetti astronomici molto deboli che richiedono osservazioni altamente sensibili. L'obiettivo principale di ANDES sarà quello di caratterizzare le atmosfere esoplanetarie dai pianeti simili a Nettuno e alla Terra, con l'obiettivo finale di cercare forme di vita. Inoltre, uno degli obiettivi più interessanti dell'ELT è la possibilità di misurare, direttamente, l'accelerazione dell'espansione dell'Universo. Tale misurazione avrebbe un grande impatto sulla comprensione dell'Universo e del suo futuro destino.

MORFEO (Multi-conjugate adaptive Optics Relay For ELT Observations) è un modulo di ottica adattiva, progettato per compensare le distorsioni dovute alla turbolenza atmosferica, così da fornire immagini nitide a MICADO e ad altri strumenti che saranno presenti in piattaforma A.

METIS sarà il quarto strumento di ELT ed avrà principalmente cinque obiettivi: esopianeti, dischi proto-planetari, corpi del Sistema Solare, nuclei galattici attivi e galassie infrarosse ad alto spostamento verso il rosso. METIS, inoltre, contribuirà a studiare: l'atmosfera marziana;

comprendere le proprietà delle nane brune a bassa massa, il centro della Via Lattea, l'ambiente delle stelle evolute e le esplosioni di raggi gamma come sonde cosmologiche.

MICADO, sarà la prima telecamera di imaging dedicata per l'ELT e funzionerà con il modulo di ottica adattiva multi-coniugata, **MORFEO**. **MICADO** consentirà di ottenere immagini estremamente nitide nel vicino infrarosso, quindi, sarà possibile studiare stelle molto deboli in galassie vicine e valutare la massa dei buchi neri. Essendo, inoltre, uno strumento estremamente potente, permetterà di esplorare ambienti in cui le forze gravitazionali sono elevate. Oltre al ruolo di imaging primario, **MICADO** include anche uno spettrografo ad apertura singola ideale per ottenere spettri di oggetti compatti. Sarà anche un potente strumento in molte aree dell'astronomia, permetterà di misurare le masse dei buchi neri delle galassie vicine, di calcolare l'età delle galassie e la loro composizione chimica.

Ultimo strumento di ELT è **MOSAIC**, di cui la fase A è stata completata. Lo spettrografo multi-oggetto, sarà utilizzato per osservazioni che si spingono anche a galassie molto distanti. Permetterà agli astronomi di tracciare la crescita delle galassie a partire dal Big-Bang, fino ai giorni nostri.

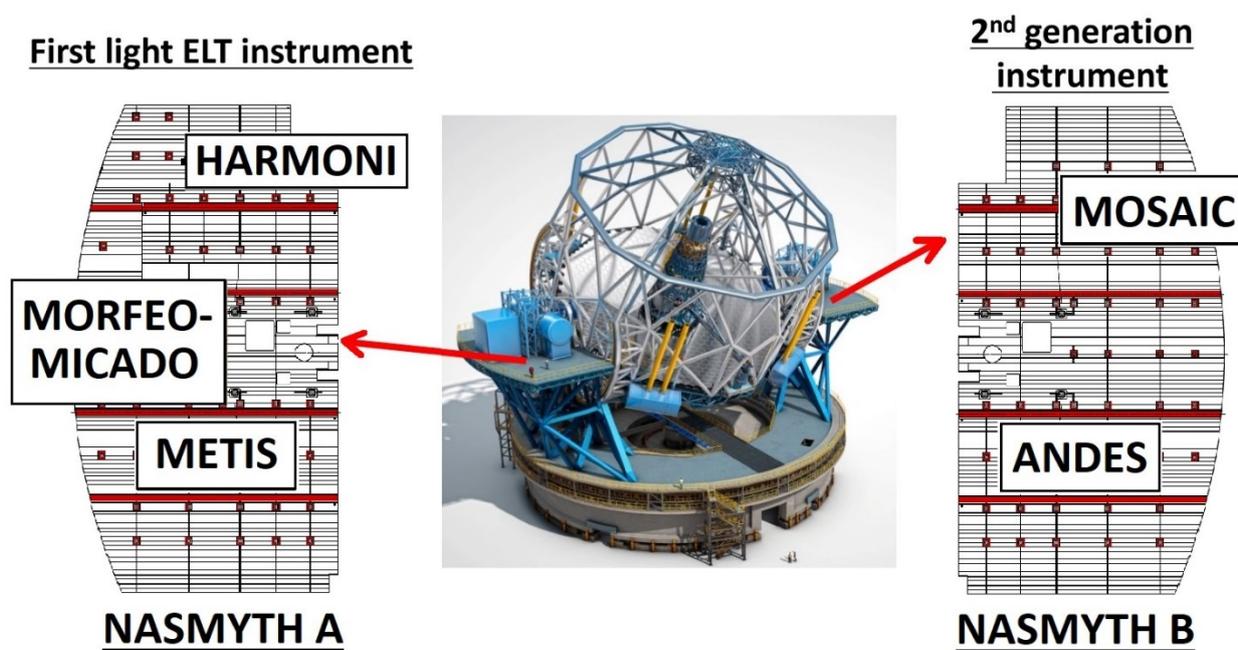


Figura 37. Strumentazione ELT in Nasmyth A e B

Su ciascuna piattaforma Nasmyth, sarà presente una **stazione prefocale (PFS)**, il cui scopo sarà quello di indirizzare la luce raccolta dal sistema ottico del telescopio, verso gli strumenti scientifici e/o verso il treno Coudé. Il nome deriva dal fatto che è l'ultimo componente optomeccanico, prima che la luce raggiunga il fuoco. La stazione prefocale A, posizionata sulla piattaforma Nasmyth A, è costituita da tre bracci meccanici mobili, contenenti dei sensori che aiutano a controllare il preciso posizionamento del telescopio verso gli oggetti celesti. Inoltre, questi sensori, inviano informazioni anche al sistema di ottiche adattive di ELT per garantire l'allineamento delle ottiche stesse. La PFS-A include anche uno specchio piatto mobile che riflette la luce proveniente dallo specchio M5 ai due strumenti HARMONI e METIS, montati su ciascun lato, ed a MORFEO e MICADO, posti dietro la stazione stessa.

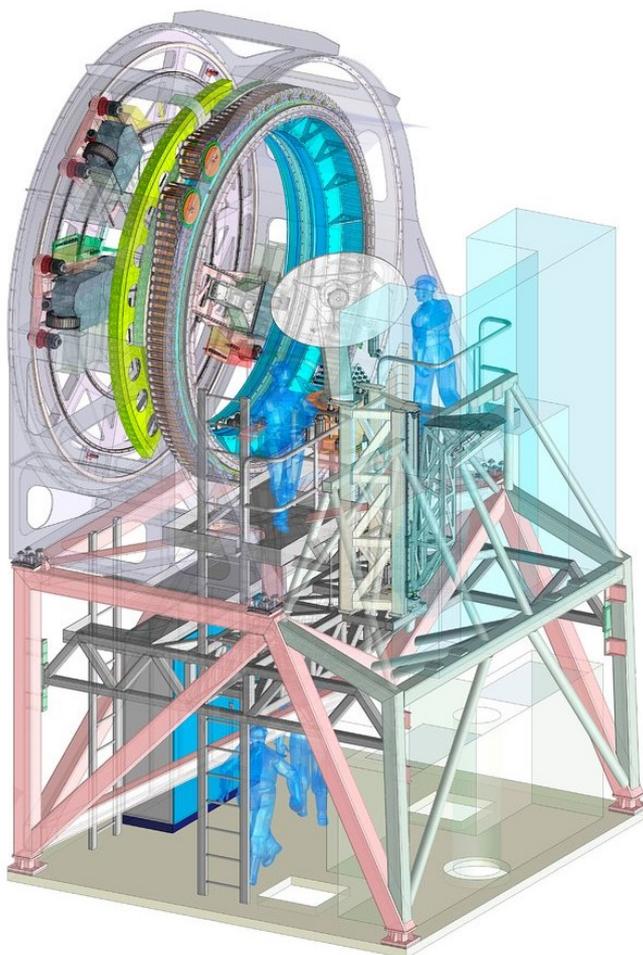


Figura 38. PFS: Prefocal Station sulla Nasmyth A

2.4 La qualità ottica di ELT

L'immagine di una sorgente puntiforme è descritta tramite una funzione, detta **Point Spread Function (PSF)**. La forma di questa funzione dipende da quali fattori limitano la qualità dell'immagine; questi fattori possono essere la diffrazione della luce, la qualità delle ottiche del telescopio e la turbolenza atmosferica.

2.4.1 Il Seeing

L'aberrazione generata dall'atmosfera è comunemente conosciuta con il nome di **seeing**. Tutte le riprese astronomiche effettuate da terra soffrono della turbolenza che disturba il fronte d'onda proveniente dalle stelle. Infatti, se questo attraversa strati ad alto indice rifrattivo esso viene ritardato rispetto a quello che attraversa zone con indice differente. Il risultato è che se prima di attraversare l'atmosfera il fronte d'onda si presenta piatto, successivamente, sotto l'influenza degli strati di turbolenza, questo si deforma. I movimenti dell'aria danno facilmente origine a turbolenze, viscosità, frammentazione e ricomposizione di corpi gassosi (cellule) di entità assai diverse; in altri termini, quel quadro dinamico che, alterando in modo caotico e imprevedibile l'indice di rifrazione dell'aria, è responsabile del deterioramento delle immagini delle sorgenti celesti.



Figura 39. Immagini di Nettuno ottenute dal VLT: con ottiche adattive (a sinistra) e senza AO (a destra)



Tale deterioramento è funzione della lunghezza d'onda e causa, pertanto, variazioni di colore della sorgente astronomica osservata, oltreché variazioni nello splendore e nella posizione apparente. Nelle molteplici cause che presiedono al seeing astronomico, le ricorrenze diurne e stagionali influiscono senza alcun dubbio sulle condizioni meteorologiche scatenanti. Subito dopo il sorgere del Sole, per esempio, allorché il riscaldamento incipiente del suolo si mantiene ancora in equilibrio con la dissipazione termica, le masse aeree sovrastanti tendono a rimanere stratificate per qualche tempo, prima di venir sconvolte dalla turbolenza convettiva. Elementi ritenuti benefici per la qualità dell'osservazione celeste sono un certo tasso d'umidità dell'aria, alte pressioni, una leggera caligine perché indice – al pari dell'umidità – di assenza di rimescolamento aereo. Riguardo alle influenze stagionali, mentre le notti estive offrono generalmente maggiori probabilità favorevoli all'osservazione, grazie a una più accentuata stabilità meteorologica, quelle invernali, risultano assai sovente turbate a motivo del flusso, in alta quota, di correnti “a getto” che introducono inaccettabili degradazioni nella qualità delle immagini. È per tali ragioni che nascono i sistemi di ottica adattiva.

2.4.2 **Ottiche attive e adattive**

Nei telescopi precedenti ad ELT si sfrutta la logica dell'ottica attiva. Ciascuno dei telescopi del Very Large Telescope ha uno specchio primario semi flessibile il quale sfrutta un sistema di ottica attiva con cui è possibile preservare la qualità ottimale dell'immagine accoppiando uno specchio flessibile con degli attuatori che vanno a regolare attivamente la forma dello specchio durante le osservazioni. Quando il telescopio ruota per osservare in una direzione diversa, la posizione e la forma variano. L'ottica attiva riesce a correggere queste distorsioni andando a monitorare continuamente una stella di riferimento durante le osservazioni e un analizzatore di immagini computerizzato rileva anche le più piccole deviazioni della qualità dell'immagine ottimale. Sulla base di questi segnali, la forma e la posizione dello specchio vengono quindi regolate

automaticamente a intervalli regolari, in genere circa una volta al minuto. Tuttavia, ciò non riesce a correggere la turbolenza atmosferica che viene invece eseguita da un sistema separato di ottica adattiva. L'**ottica adattiva** nasce con la finalità principale di andare a correggere le deformazioni cercando di ricostruire il fronte d'onda originario. Una sorgente luminosa si propaga nello spazio sotto forma di onde sferiche.

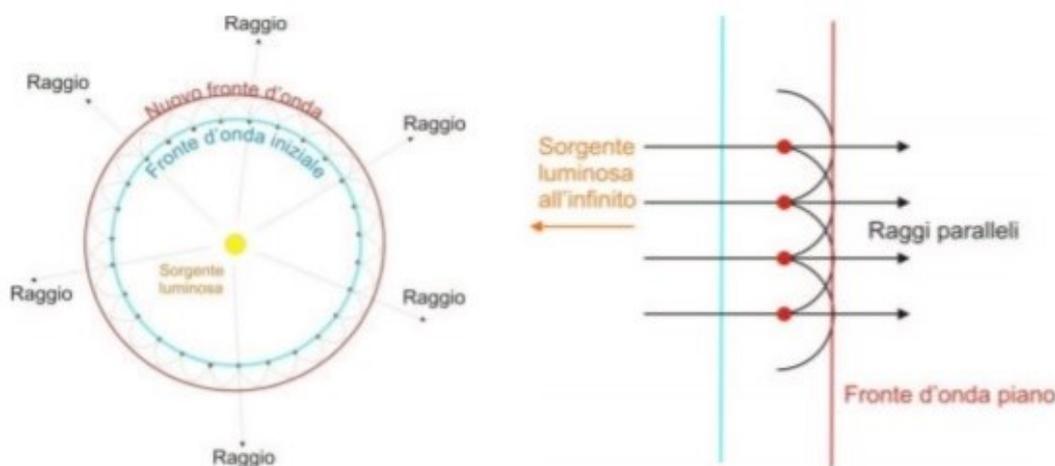


Figura 40. Propagazione sorgente luminosa

Se la sorgente luminosa è posta all'infinito come nel caso di una stella, per approssimazione si considera che i raggi provenienti da essa che arrivano a colpire l'atmosfera siano paralleli, e che viaggiando nel vuoto non essendo disturbati da nessun elemento, riescano a formare un fronte d'onda piano. Quando la luce penetra l'atmosfera per arrivare poi allo strumento di rilevazione, questi raggi vengono deformati. È possibile applicare una superficie ottica in grado di correggere queste deformazioni, appunto con delle ottiche adattive.

I sistemi ad ottica adattiva lavorano grazie a speciali specchi che, seguendo le istruzioni (centinaia di comandi al secondo) inviate da appropriati computer, si deformano in tempo reale in maniera tale da compensare e correggere le distorsioni provocate dall'atmosfera sul fascio di luce proveniente dalle stelle. La tipologia e l'entità delle deformazioni da dare agli specchi sono determinate dal computer sulla base di come appare una stella molto brillante osservata simultaneamente all'oggetto astronomico che si sta studiando.

3. MORFEO PROJECT: OTTICA ADATTIVA PER ELT

Il *Multi-conjugate adaptive Optics Relay For ELT Observations* è un modulo di ottica adattiva post-focale. Esso supporterà MICADO, “offrendo” due differenti modalità di ottica adattiva:

- l'**ottica adattiva multiconiugata MCAO** (*Multi-Conjugate Adaptive Optics*), necessaria per garantire una compensazione ottica uniforme sull'intero campo visivo di MICADO;
- l'**ottica adattiva monoconiugata SCAO** (*Single-Conjugate Adaptive Optics*), utilizzata per ottenere le massime prestazioni, quando sono presenti stelle guida naturali nelle vicinanze dell'oggetto celeste d'interesse.

L'ESO ha affidato all'INAF la progettazione e la realizzazione di **MORFEO**, grazie al quale, sarà possibile sfruttare l'ottica adattiva multiconiugata con stelle guida artificiali. MORFEO calcola la conformazione che devono assumere gli specchi adattivi, analizzando la luce proveniente da sei stelle guida artificiali generate da fasci laser al sodio e da tre stelle guida naturali. Grazie alla deformabilità degli specchi, si possono compensare in tempo reale i disturbi dovuti al vento e alla turbolenza dell'atmosfera, migliorando drasticamente la qualità delle osservazioni effettuate dal telescopio.

Attualmente, si sta entrando nella **Fase C** del progetto MORFEO, avendo quasi concluso la fase di Preliminary Design Review (PDR) per tutti i WP del consorzio. Il Consorzio, formalmente, sta finalizzando la chiusura della **Preliminary Design Review** con ESO, consentendo al progetto il passaggio alla fase di progettazione finale nonché allo start delle attività di commissioning dei vari sottosistemi. Di seguito vedremo, nel dettaglio, le fasi, le peculiarità e le figure coinvolte in un progetto scientifico/tecnologico nel contesto ESO “ground-based”. Le fasi di un progetto spaziale, infatti, sono leggermente diverse, in quanto anche i tempi scala sono abbastanza differenti da un progetto astronomico da terra.

3.1 Il ciclo di vita di un progetto

Ogni progetto ha un proprio **life cycle**, diviso in una serie di step, opportunamente definiti che, partono dal concepimento stesso dell'idea. Quando ciascuna fase volge al termine, è necessario stabilire se è possibile proseguire o meno allo step successivo, le cosiddette decisioni go/no-go. Nel caso in cui non si riuscisse ad ottenere l'autorizzazione a proseguire, si ritorna allo step precedente, si riduce il numero di obiettivi fissati in partenza, oppure, in casi estremi, l'intero progetto cessa di esistere. Di seguito sono riportate le varie fasi del **Project Life Cycle**, ciascuna delle quali termina con una “**review**”, ovvero una riunione (o meglio una revisione) in cui sono presenti esperti che valutano i risultati ottenuti e decidono come (o se) proseguire. Un progetto, indipendentemente dalla complessità e dalla sua durata, si sviluppa attraverso una serie di fasi nelle quali si definiscono requisiti tecnici, caratteristiche operative, costi ed eventuali rischi.

Le varie fasi, in cui si articola un progetto scientifico ground-based, sono denominate:

- **Pre-fase A – Concept studies**
- **Fase A – Preliminary analyses**
- **Fase B – Project definition**
- **Fase C – Design**
- **Fase D – Development**
- **Fase E – Operations**

Pre-Phase A - Concept studies. Tale step, che precede la fase A, riguarda la ricerca di idee scientifiche e tecnico/realizzative, volte alla determinazione di obiettivi ben definiti e di idee progettuali da approfondire tramite ulteriori studi di settore.

Phase A - Preliminary analysis. In tale fase vengono esaminate la desiderabilità scientifica e la fattibilità tecnica dell'idea, che deve essere opportunamente validata. Inoltre, è opportuno trovare il giusto compromesso tra i costi da sostenere e le prestazioni richieste. Ci si aspetta che, una volta



terminata tale fase, si abbiano a disposizione i requisiti scientifici, gli obiettivi del programma, le analisi economiche e le modalità tecnico/realizzative dell'opera. Infine, viene effettuata una revisione del progetto, ovvero una "Observatory design review".

Phase B - Project definition. In tale stadio è necessario definire una quantità sufficiente di dettagli, in maniera tale da stabilire una progettazione di base, sufficientemente credibile e soprattutto fattibile. La fattibilità consiste nel trovare un punto di incontro tra gli obiettivi scientifici ed i vincoli economici. Per essere credibile, la progettazione non deve dipendere da svolte improvvise nello stato dell'arte. Affinché siano valide tali condizioni, è importante realizzare una preliminary design sufficientemente robusta e dimostrare di avere una buona padronanza degli sviluppi tecnologici richiesti. Durante la fase B c'è la "**System Requirements Review**" per stabilire i requisiti scientifici e tecnici del progetto. Inoltre viene effettuata anche la "**Non Advocate Review**" (NAR) per valutare la chiarezza e la completezza del management plan. In chiusura di questa fase, si passa alla "**Preliminary Design Review**" (PDR), durante la quale è necessario risolvere tutte le possibili criticità, prima di giungere alla fase successiva. Per garantire l'imparzialità, PDR e NAR devono essere giudicate da commissioni di esperti esterne ai progetti.

Phase C - Design. Arrivati a tale punto, il design deve essere pronto per essere realizzato, integrato e verificato. Continuano gli studi commerciali e vengono realizzati prototipi ingegneristici, tenendo anche presenti i "cost risks". Successivamente, al fine di chiudere tale fase, si deve superare la "**Final Design Review**" (FDR), sempre con valutatori esterni al progetto.

Phase D - Development. Lo strumento viene realizzato e si deve verificare che rispetti tutti i requisiti definiti in Fase C in modo da poter essere ritenuto pronto per la messa in esercizio. Contemporaneamente vengono integrati sia le procedure di manutenzione che i manuali operativi.

Phase E - Operations. Questa è la fase osservativa durante la quale si valutano i risultati finali, lo strumento viene messo in funzione e si apportano eventuali miglioramenti (se necessari).

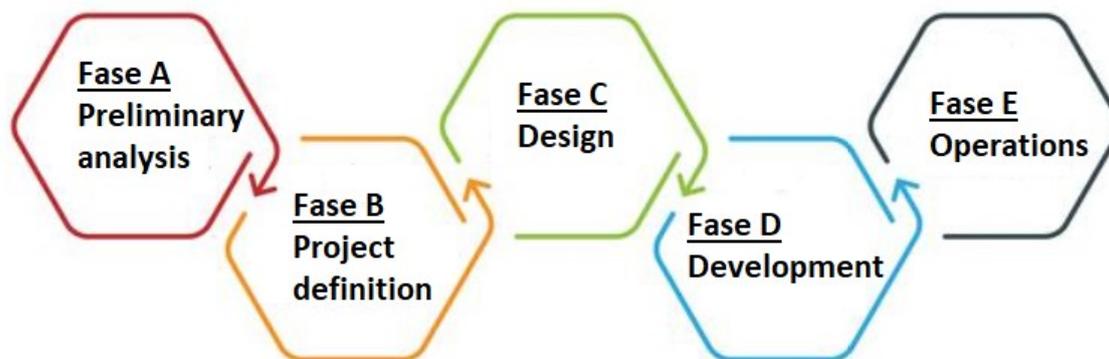


Figura 41. Fasi di sviluppo di un progetto

3.2 Il consorzio MORFEO

L'ESO ha affidato la progettazione e la realizzazione di MORFEO ad un consorzio composto da:

- **Istituto Nazionale di Astrofisica** in Italia;
- **Institut de Planétologie et d'Astrophysique de Grenoble (IPAG)** in Francia;
- **National University of Ireland, Galway (NUI Galway)** in Irlanda.

L'IPAG è un'unione dell'Institute of the **Université Grenoble Alpes** e del **CNRS (Centre National de la Recherche Scientifique)**. In particolare, l'IPAG dipende dall'INSU, *Istituto Nazionale delle Scienze dell'Università*, il quale è uno dei dieci istituti del CNRS in Francia.

Il player principale del consorzio, in termini di leadership e man-power coinvolto, è l'**INAF** che fornisce il **Principal Investigator (PI)** ed il **MORFEO Project Office (PO)** detenendo, così, sia la leadership tecnica che scientifica del progetto.

Collaborano a tale progetto **sei Osservatori sedi** dell'INAF: l'Osservatorio di Astrofisica e Scienza dello Spazio (OAS - Bologna), l'Osservatorio di Arcetri (OAA - Firenze), l'Osservatorio Astronomico di Brera-Merate (OAB - Milano), l'**Osservatorio Astronomico di Capodimonte (OACN - Napoli)**, l'Osservatorio Astronomico di Padova (OAPD - Padova) e l'Osservatorio Astronomico dell'Abruzzo (OAAb - Teramo).



La figura di responsabilità principale di ogni progetto scientifico è il **PI**. Egli è a capo dei gruppi scientifici e tecnici ed è il responsabile di tutte le attività di approvvigionamento, produzione, integrazione, test e consegna di MORFEO entro il tempo assegnato al consorzio dal **MOU** con l'ESO. Il MOU, Memorandum Of Understanding, rappresenta un documento giuridico che descrive un accordo bilaterale fra le due parti.

Il PI è il punto di contatto formale con l'ESO: riporta aggiornamenti continui circa l'avanzamento del progetto e garantisce le risorse necessarie per lo svolgimento delle varie attività. Lavora in coordinamento con la **Direzione Scientifica** e l'**Ufficio Progetti** dell'INAF. Inoltre, il PI ha la responsabilità di riferire le attività del Consorzio al Comitato Direttivo e di ricevere da quest'ultimo indicazioni sulla direzione principale del progetto. Il Principal Investigator (PI) di un progetto è nominato direttamente dal presidente dell'INAF.

Il **MORFEO Project Office** fornisce tutte le funzioni necessarie per assicurare il corretto sviluppo dello strumento a livello di sistema e di sottosistemi, ad eccezione dei sottosistemi che hanno un proprio **Local Project Office** (LPO). Nel piano attuale, i sottosistemi con un Local Project Office sono il modulo **LGS WFS** e il modulo **LOR WFS**. L'ufficio di progetto MORFEO comprende:

- **Principal Investigator (PI)**
- **Project Manager (PM)**
- **Instrument Scientist**
- **System Engineer (SE)**
- **System MAIV Engineer**
- **Product Assurance Manager**
- **System Team**

Di seguito, si riporta un diagramma di Management del progetto MORFEO.

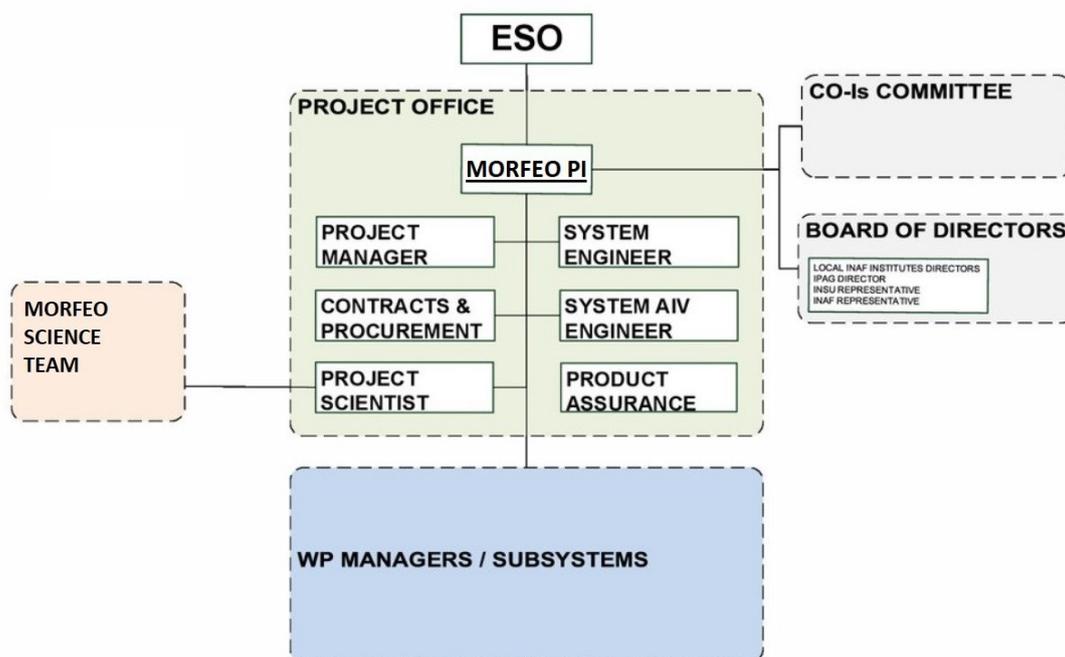


Figura 42. MORFEO Management diagram

La gestione progettuale di MORFEO è sotto il controllo del **Responsabile di Progetto (PM)**, che è responsabile di: definire il programma generale di MORFEO necessario per raggiungere le tappe fondamentali del progetto, monitorare le risorse dell'intero progetto, definire le scadenze per i responsabili dei WP. Avrà, inoltre, il compito di monitorare, con il supporto dei tecnici, l'adeguatezza dell'implementazione dello strumento rispetto ai requisiti scientifici, monitorare i progressi degli Istituti e delle industrie partecipanti, definire e convocare revisioni e riunioni interne al progetto, necessarie per garantire il successo nonché il corretto sviluppo del progetto.

Il **MORFEO Instrument Scientist** ha la responsabilità di assicurare che il progetto soddisfi tutti i requisiti scientifici. L'Instrument Scientist consiglierà il PO su tutti i requisiti scientifici ed operativi e sarà responsabile del coordinamento tra il gruppo scientifico ed il gruppo tecnologico.

Il **System Engineer (SE)** deve assicurare l'integrazione delle attività di ingegneria del progetto, concordare un'architettura di sistema, definire e/o controllare le interfacce esterne ed interne, è responsabile del mantenimento dei budget di sistema, verifica la progettazione e le prestazioni



rispetto ai requisiti. L'Ingegnere di sistema di MORFEO è un membro permanente del team di consulenti tecnici del progetto.

System MAIV Engineer è responsabile della produzione del piano MORFEO MAIV (Maintenance Assembly Integration & Verification) e delle procedure di integrazione, della verifica nonché delle procedure MAIV dei sottosistemi, della produzione del MORFEO Verification Control Document (VCD). Accorda, inoltre, le procedure di integrazione, test e verifica di MORFEO per l'integrazione e la messa in servizio di MORFEO + MICADO con ESO.

Il **MORFEO Product Assurance Manager** è responsabile di quanto segue: approvare ed implementare il MORFEO Product Assurance Plan; coordinare e fornire consulenza ai responsabili PA dei principali partner del Consorzio; approvare i piani PA dei principali partner del Consorzio; effettuare la sorveglianza della PA ed il controllo degli Istituti del Consorzio MORFEO, compresi gli audit e l'accettazione degli items; definire le non conformità di un progetto nel Non Conformity Report (NCR); controllare le conformità anche di subappaltatori e fornitori; convocare e presiedere i Material Review Boards (MRB) e partecipare alle Test Readiness Review (TRR); implementare parti, attività di controllo di materiali e processi; assicurare la corretta esecuzione delle attività di garanzia e di affidabilità, del rilascio dei documenti di approvazione delle parti; concordare e fornire la documentazione necessaria sotto forma di registri e pacchetti di dati di accettazione; partecipare a tutte le principali revisioni e test al fine di fornire i relativi input della PA; assicurare che gli aspetti di pulizia, controllo della contaminazione e sicurezza siano adeguatamente coperti. Il responsabile della PA è membro del MORFEO Project Office e lavora in coordinamento con il Project Manager del progetto ed il suo System Engineer. **Il responsabile della PA ha un ruolo indipendente all'interno del team** e ha il diritto di agire indipendentemente dal PM nelle questioni relative alla PA, se necessario, nei confronti del PI e dell'ESO.

Il **MORFEO System Team** è una squadra tecnica che raggruppa i vari pacchetti di sistema del progetto. Fa parte di tale gruppo anche il SE. Poiché MORFEO è uno strumento molto complesso e la conoscenza dell'intero strumento non può essere delegata a una o due persone, il System Team fornisce al PI una consulenza tecnica su questioni globali o urgenti ogni qual volta si ritiene necessario. È comunque presieduto dal SE di MORFEO.

Il **MORFEO PT**, product tree, costituisce la base delle MORFEO Work Breakdown Structures (WBS) e dimostra l'attuale configurazione del MORFEO Project, come concordato tra tutti i Consortium Partners. La WBS contiene la suddivisione strutturata dell'intero progetto nei diversi **WP (Work Package)**. Le attività, oggetto di questi lavoro di dottorato, sono state svolte nel **WP PM0 - Main Structure** di cui sono deputy WP manager (evidenziato in Figura 43).

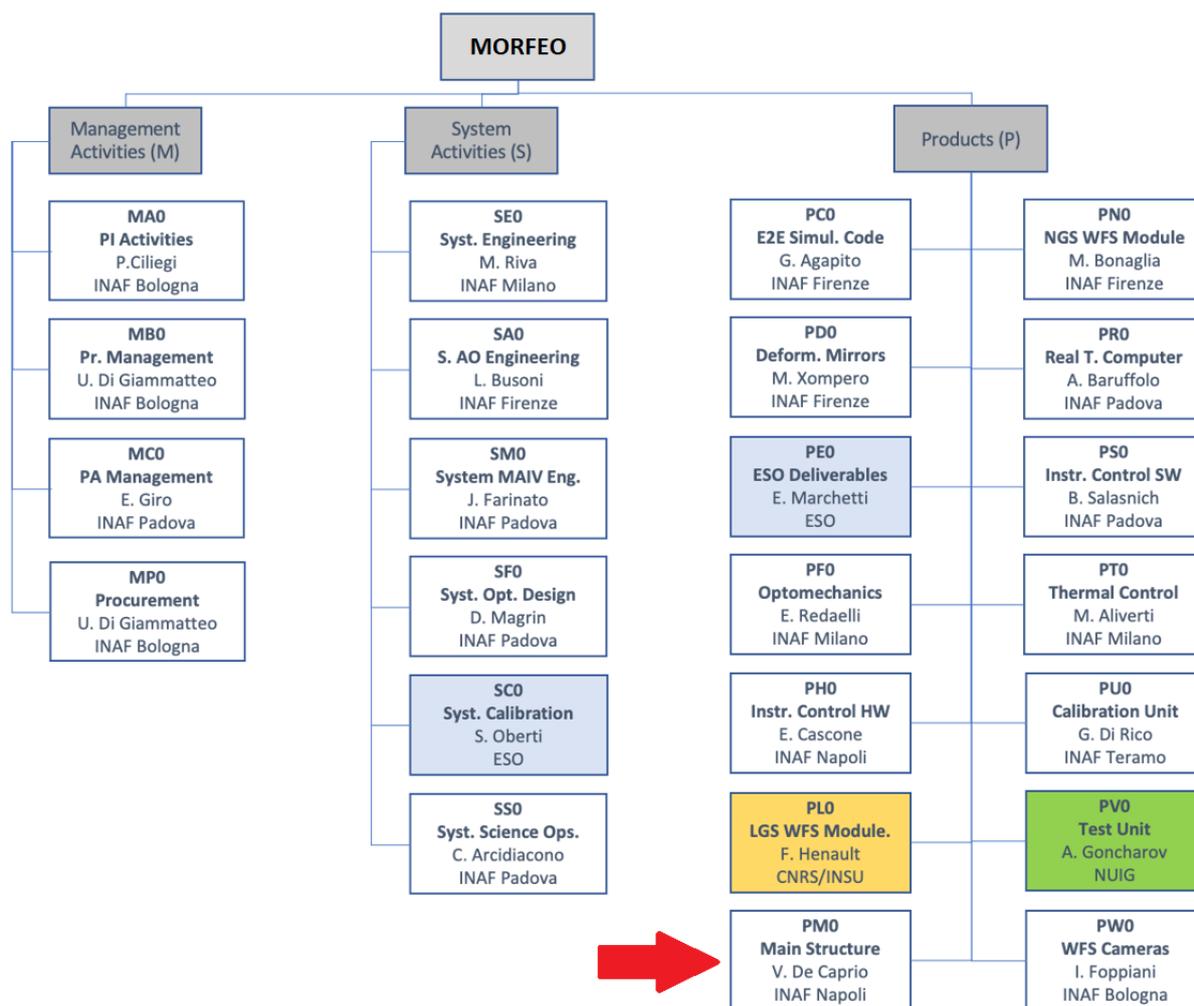


Figura 43. MORFEO WBS (Work Breakdown Structure)

3.3 Modalità operative di MORFEO

Le due modalità operative di MORFEO sono: l'**ottica adattiva multi-coniugata (MCAO)** e l'**ottica adattiva mono-coniugata (SCAO)**.

In ELT, con un sistema di specchi deformabili controllati da computer, si ha la possibilità di correggere in tempo reale la distorsione causata dalla turbolenza dell'atmosfera terrestre, rendendo le immagini ottenute quasi nitide come quelle acquisite nello spazio. L'ottica adattiva richiede una stella di riferimento abbastanza luminosa e vicina all'oggetto di studio. Attraverso tale stella si va a misurare il grado di sfocatura causata dall'atmosfera locale. Poiché non sempre è presente una stella adatta e nota nel cielo, si vanno ad utilizzare delle stelle artificiali, create con dei laser.

La modalità di ottica adattiva multi-coniugata di MORFEO si basa sull'uso di 6 stelle guida artificiali (**LGS – Laser Guide Stars**), necessarie a coprire la maggior parte del cielo, lanciate lateralmente allo specchio primario. A causa dell'indeterminazione dell'inclinazione e della massa degli LGS sono necessarie 3 stelle guida naturali (**NGS**). La modalità ottica, adattiva mono-coniugata, ha lo scopo di ottenere delle prestazioni migliori rispetto al caso precedente su un campo visivo relativamente più piccolo quando la stella guida naturale si trova vicino al bersaglio.



Figura 44. Immagine illustrativa dell'LGS – Laser Guide Stars di ELT

MORFEO è costituito da un relay ottico abbastanza complesso, supportato dalla Main Support Structure (MORFEO_MSS) montata direttamente sulla piattaforma Nasmyth A di ELT.

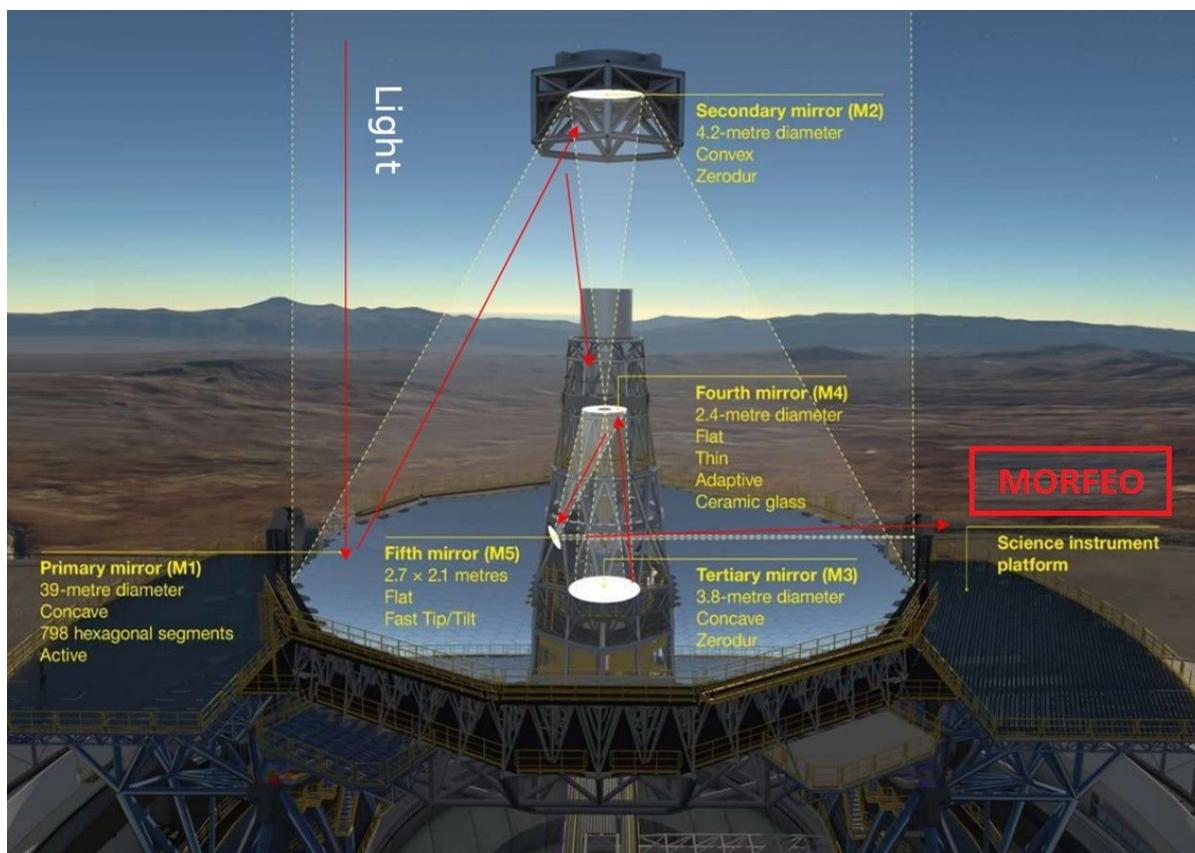


Figura 45. Posizione di MORFEO rispetto al path ottico di ELT

Il relay è composto da diversi elementi ottici, da un beam da un *splitter dicroico* che separa la luce scientifica dalla luce dell'LGS (Laser Guide Star) oltre che da 2 specchi deformabili (DMs). Nella modalità MCAO, per il rilevamento del fronte d'onda, si sfruttano al massimo 6 stelle guida laser nel caso di fonte d'onda di alto ordine e tre stelle guida naturali nel caso di fronte d'onda di basso ordine. La compensazione del fronte d'onda è raggiunta grazie ai due specchi deformabili di MORFEO che lavorano in sinergia con gli specchi M4 e M5 di ELT. In questa modalità, il rapporto di Strehl, fornito da MORFEO, dovrà essere $SR \geq 0.3$ a $\lambda = 2.2\mu\text{m}$, in condizioni atmosferiche mediane, ossia, quel valore che divide a metà il set di valori considerati. Il rapporto di Strehl rappresenta il rapporto tra il massimo valore di PSF raggiungibile dal sistema ottico in esame ed

il massimo valore di PSF^4 raggiungibile da un sistema ottico ideale (per una pupilla di medesime dimensioni), limitato solo dalla diffrazione. L'obiettivo è quello di raggiungere un rapporto di Strehl pari a 0.5 ed a tal proposito verrà utilizzato un secondo specchio deformabile all'interno di MORFEO. La luce proveniente da ELT, entra in MORFEO seguendo il percorso ottico principale, e una volta superati gli specchi deformabili post focali, la luce viene divisa in due path dallo splitter dicroico. La luce di lunghezza d'onda inferiore a 60 nm, è indirizzata verso l'LGS attraverso il suo percorso ottico, fino ad arrivare al sensore di fronte d'onda dell'LGS, mentre, la luce che supera i 600 nm, è inviata al percorso ottico principale, giungendo alla porta di uscita verso MICADO. MORFEO fornirà luce anche ad un secondo strumento, posto alla sua destra nella vista dall'altro della Nasmyth A, riportato nella figura seguente.

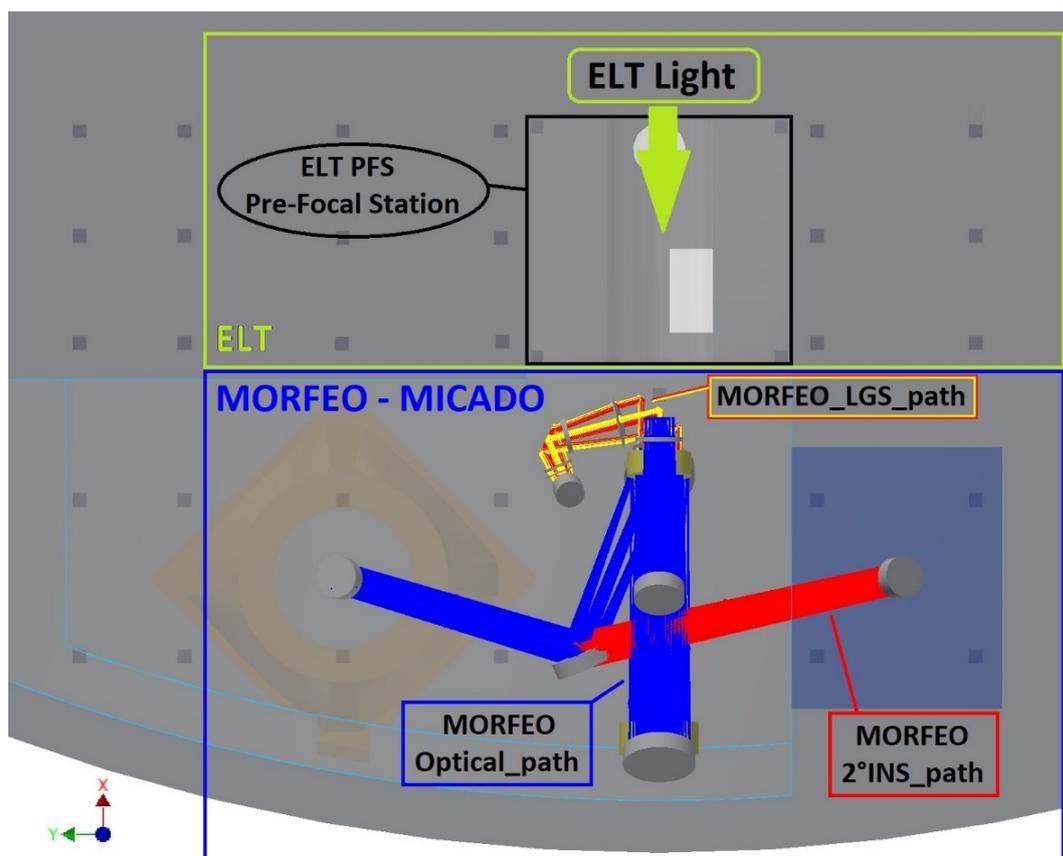


Figura 46. MORFEO Optical path sulla NP

⁴ *PSF*: Point Spread Function rappresenta il modello di diffrazione tridimensionale della luce emessa da una sorgente di punti infinitamente piccoli.

Le misure del fronte d'onda eseguite dai sensori LGS e LOR (Low-Order and Reference), questi ultimi sono dei sensori di fronte d'onda utilizzati per captare la luce proveniente dalle stelle guide naturali, sono elaborate dal Real Time Computer (RTC), che aziona gli specchi deformabili post-focali e guida gli attuatori del telescopio, attraverso il sistema di controllo centrale.

Nella modalità SCAO, si sfrutta lo stesso percorso ottico con l'unica differenza che non vengono utilizzate le stelle guida laser. È attraverso lo splitter dicroico che la luce viene trasmessa a MICADO. Su MORFEO, inoltre è presente un sistema di Calibration e Testing Unit, il cui scopo principale è quello di calibrare i sensori di fronte d'onda LGS e NGS.

3.4 MORFEO: Layout ottico

Il design ottico “baseline” di MORFEO è essenzialmente costituito da sei specchi di cui 2 deformabili, uno splitter dicroico ed una lastra correttiva in ingresso al piano focale. I sei specchi vanno da M6 a M12a o M12b a seconda che si alimenti MICADO o il 2° strumento. In Figura 47 è evidenziata la combinazione degli specchi, il volume occupato da MICADO ed il folding per la seconda porta dell'ulteriore strumento che MORFEO alimenterà.

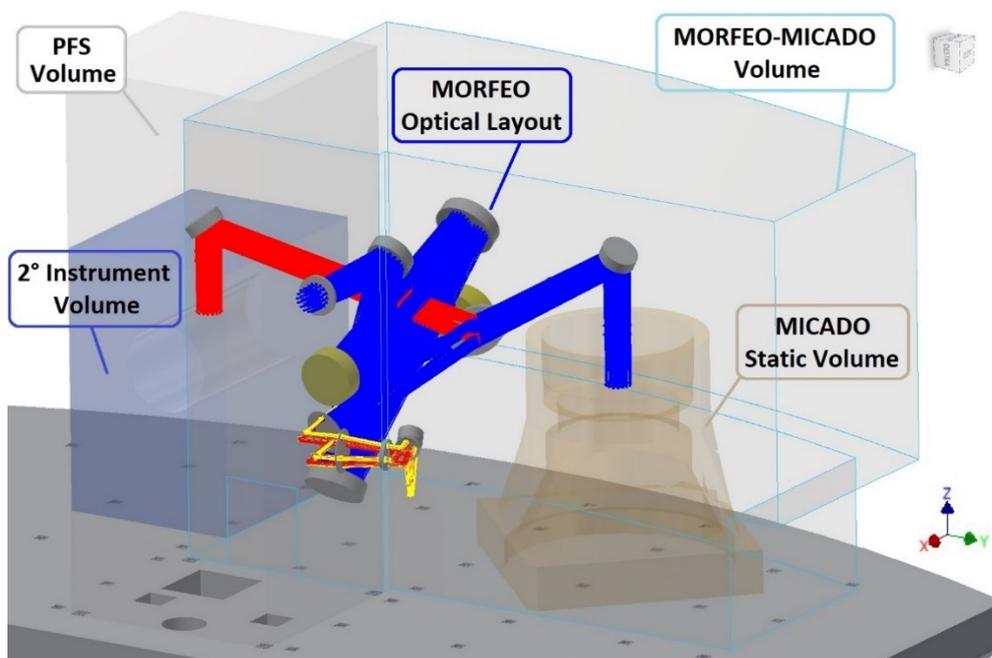


Figura 47. MORFEO Optical Design

M6 è la prima superficie ottica che si incontra nel path ottico di MORFEO dopo la piastra correttiva di Smith, posta in ingresso al piano focale di ELT. Successivamente ad esso, si ha una superficie ottica come **M7**, posta a meno di 1 metro dalla NP che, a sua volta, folda il fascio verso **M8**, quasi al bordo della Nasmyth A. Sono presenti, poi, due *Deformable Mirrors* (**DMs**), **M9-DM1** e **M10-DM2**, con la stessa potenza ottica, a cui segue **M11**, un flip mirror, che ha la funzione di foldare il fascio verso due path ottici differenti, ruotando attorno ad un asse fisso.

Quest'ultimo, infatti, invia la luce alla porta a gravità invariante per MICADO o a quella per il 2° strumento. Di seguito, è riportata la configurazione attuale del disegno ottico (presentata in PDR) e sono specificati i singoli elementi che lo costituiscono.

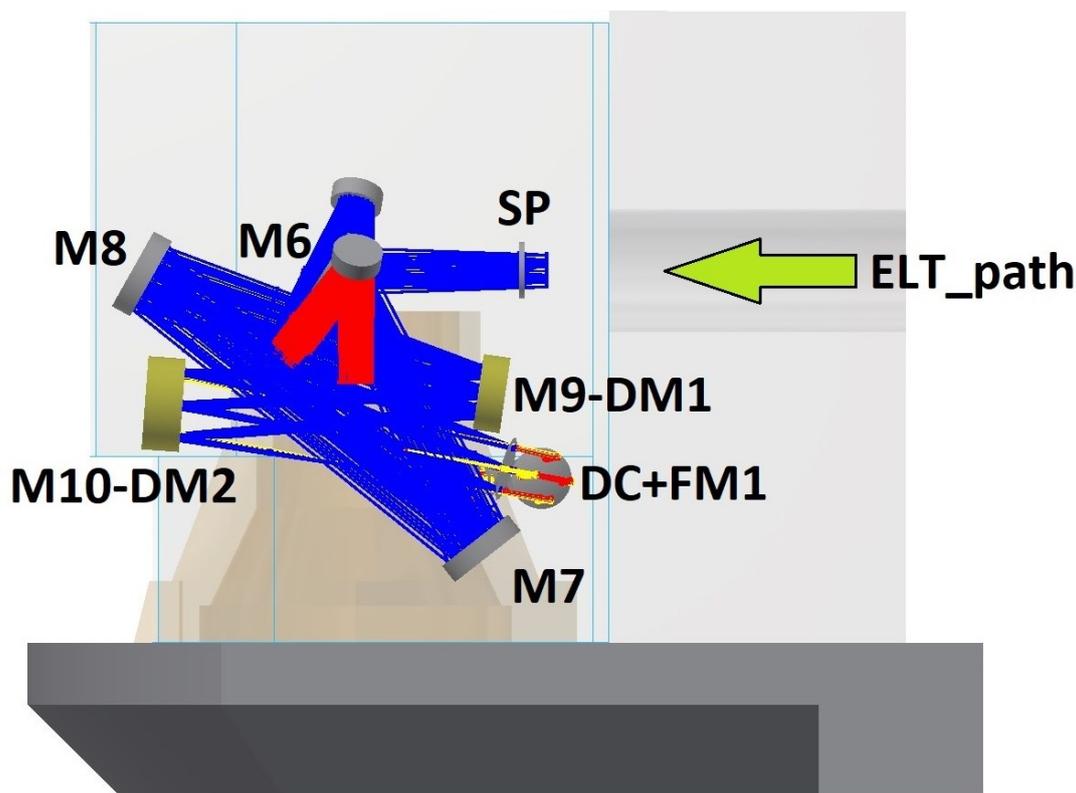


Figura 48. MORFEO Optical Design

Nell'attuale configurazione ottica gli specchi non giacciono tutti nello stesso piano, infatti, in fase di realizzazione del layout si è cercato di sfruttare tutto il volume rimasto a disposizione sulla NP, inserendo, per esempio, il ramo LGS in una posizione laterale rispetto al main path di MORFEO.

Durante la fase B del progetto, sono stati presentati diversi layout ottici, prima di giungere alla configurazione attuale. Ciò, è dovuto al fatto che, per poter garantire un corretto funzionamento dello strumento, si deve tener conto di numerosi fattori tra cui l'annoso problema relativo all'allineamento ottico, per soluzioni ottiche estreme come quella di MORFEO.

Nella figura seguente, al fine di poter comprendere meglio il percorso dei fasci/beams "ottici", si è evidenziato, con una diversa colorazione, ciascun percorso:

- Beams **blu - main path**: percorso scientifico dal piano focale del telescopio a MICADO;
- Beams **rossi - secondary path**: percorso scientifico indirizzato verso il secondo strumento;
- Beams **giallo/rossi - LGS path**: percorso dei raggi LGS verso il wavefront sensor (WFS).

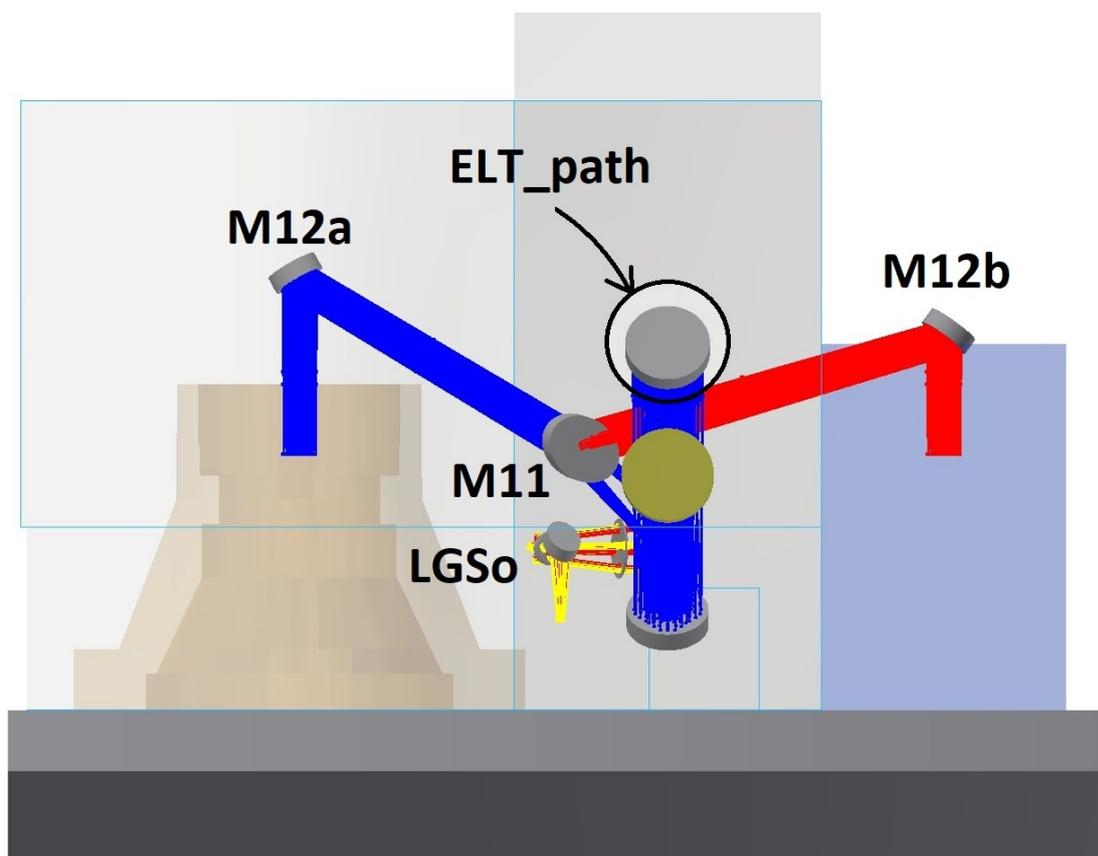


Figura 49. Vista frontale dei diversi percorsi ottici

4. MORFEO: dai requisiti alla FEA

In questo capitolo si definirà il contesto tecnico in cui si opera quando si lavora alla progettazione di strumentazione Ground-based per ELT/VLT, in ambiente ESO. Si andranno a considerare i requisiti, le normative tecniche da rispettare, le tipologie di analisi da effettuare e gli aspetti teorici di riferimento per le analisi stesse. In particolare, verranno specificati i criteri e le procedure per poter verificare analiticamente le prestazioni ed i requisiti di sicurezza meccanica di un sistema principale e/o di un sottosistema. Si farà esplicito riferimento al documento ESO, **Engineering Analysis Standard**, Document Number: GEN-SPE-ESO-50000-5600, Version 2. In tale documento si specificano, tra le altre cose, anche i criteri e le procedure per la verifica analitica delle prestazioni meccaniche di telescopi, antenne, strumenti scientifici e componenti strutturali da installare in tutte le sedi osservative dell'ESO. Nell'*Engineering Analysis Standard* si stabiliscono i requisiti generali e le necessarie linee guida utili allo sviluppo di modelli ad elementi finiti per le analisi strutturali, sismiche, termiche, di instabilità, di fatica e CFD. Inoltre, al fine di poter valutare l'affidabilità dei modelli ed i risultati delle analisi FEA, vengono proposte anche delle procedure di verifica e validazione dei modelli FEM prodotti.

4.1 Documenti di riferimento

L'ESO Engineering Analysis Standard include, al suo interno, i seguenti documenti di riferimento:

- Eurocode 0 - Basis of structural design; EN 1990:2000
- Eurocode 1 - Actions on structures, All parts, EN 1991
- Eurocode 2 - Design of concrete structures, EN 1992
- **Eurocode 3 - Design of steel structures**, All parts, EN 1993-1-x:2005
- **Eurocode 8 - Design of structures for earthquake resistance**. Part 1, General rules, seismic actions and rules for buildings. BS EN 1998-1:2004



- Seismic tests of mechanical structures for electronic equipment. Part 2: Seismic tests for cabinets and racks. International standard IEC 61587-2, Edition 2.0 2011-08
- EN 13001-2:2011 - Crane safety. General design. Load actions
- ISO 4304:1987 - Cranes other than mobile and floating cranes. General requirements for stability
- ISO 8686-2:2004 - Cranes Design principles for loads and load combinations. Part 2: Mobile cranes
- Technical Information, Advanced Optics, TIE-33 - Design strength of optical glass and Zerodur, January 2009

In generale, si applica la seguente gerarchia di norme:

1. Norme definite direttamente da ESO e nei documenti applicabili;
2. EN Eurocode Standards;
3. ISO Standards;
4. DIN, BS o altri standard nazionali equivalenti;
5. Linee guida di progettazione delle organizzazioni professionali.

Tutte le analisi agli elementi finiti, in conformità con quanto richiesto da ESO, sono eseguite con il pacchetto software **ANSYS Mechanical APDL®** o **ANSYS Workbench®**. I modelli FE sono costruiti per valutare le prestazioni delle strutture e stimare il loro comportamento, sia a livello globale che locale, mentre sono soggette ai carichi esterni applicati ed alle differenti condizioni di esercizio: operative o di sopravvivenza.

Al fine di **validare i modelli FEM**, secondo le procedure ESO dovranno essere controllati: massa totale e momenti d'inerzia, baricentri, deformazioni massime, distribuzione delle deformazioni, modi di vibrare e le corrispondenti masse effettive per i modi predominanti.

4.2 Il contributo di PM0 in MORFEO

La realizzazione di modelli FEM (modelli agli elementi finiti) permette di valutare e quantificare le sollecitazioni interne e le deformazioni cui le strutture possono essere soggette; le analisi devono essere effettuate con un software riconosciuto a livello internazionale ed il fornitore del software deve essere, naturalmente, un'azienda certificata ISO 9001. In particolare, in ambiente ESO, si predilige l'utilizzo del software CAE ANSYS, come definito nel paragrafo precedente.

Il **WP PM0 – Main Structure** in INAF-OACN è un pacchetto di lavoro del progetto MORFEO relativo alla progettazione meccanica, analisi strutturale e sviluppo tecnologico della MSS di MORFEO e di altri item tecnologici.

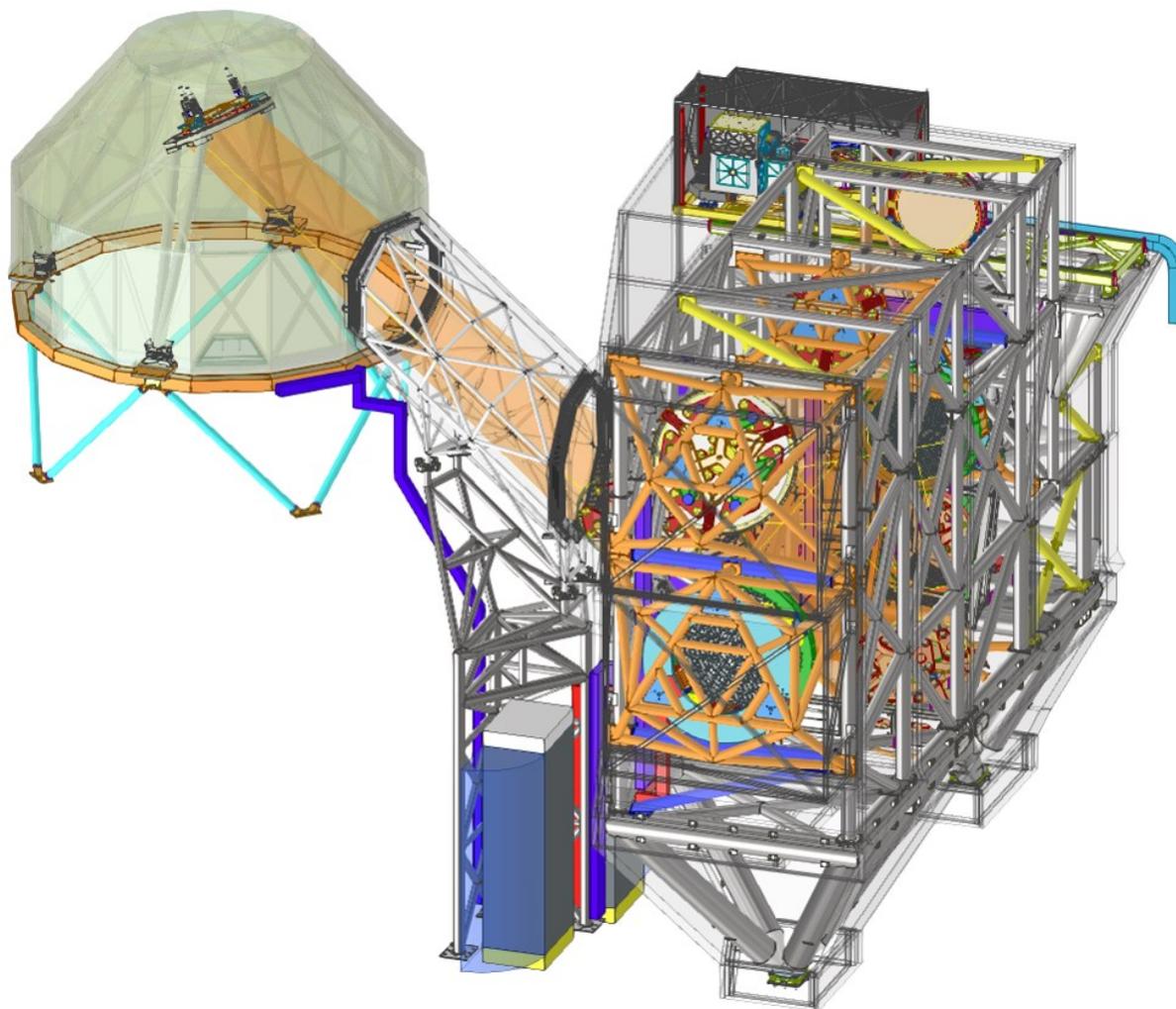


Figura 50. MORFEO Main Structure assieme generale



PM0 – Main Structure, infatti, si occupa dello sviluppo di:

- **MORFEO Main Support Structure (MORFEO_MSS)**, la struttura meccanica che ospita tutti gli elementi optomeccanici.
- **Thermal Enclosure di MORFEO**, la struttura di copertura della MORFEO_MSS.
- **Thermal duct MORFEO-MICADO**, un item posto tra MORFEO e MICADO, che comprende la struttura meccanica (parte inferiore - TORRE) ed il condotto Termico vero e proprio con il suo frame meccanico.
- **Thermal Enclosure di MICADO**, la struttura di copertura attorno a M12a installata sul lato superiore di MICADO, che include una sua struttura meccanica di supporto.
- **CU Position Selector per FM_CU e MCA**, uno slider per lo specchio di folding della MORFEO CU (FM_CU) e la MICADO Calibration Assembly (MCA), che consente al sistema di passare da una posizione all'altra per la calibrazione prima di MORFEO e poi di MICADO.

Tutte le analisi strutturali riportate in questo documento sono riferite alla **MORFEO_MSS**, il case study del mio percorso di PhD. Su di essa sono considerati come carichi esterni applicati tutti gli altri item che sono direttamente collegati alla struttura, tra cui: il Thermal Enclosure di MORFEO, parte del Thermal duct MORFEO-MICADO, il CU Selector per FM_CU e MCA oltre che tutte le optomeccaniche e gli altri Subsystem.

Per eseguire i calcoli ingegneristici attraverso l'approccio FEA sono state fatte una serie di ipotesi; di seguito si illustrano i punti in comune validi per i modelli prodotti da PM0 – Main Structure.

- a. Il sistema di coordinate di riferimento globale viene importato direttamente dal software CAD al Pre-processor CAE (Ansys SpaceClaim). È allineato con il sistema di coordinate standard MORFEO C-SYS definito nel paragrafo 4.2.3. Naturalmente, tutti i risultati vengono forniti in questo sistema di coordinate.



- b. I materiali utilizzati per le analisi FE sono specificati nel paragrafo 4.4, dove sono riportati quelli di uso comune con le loro proprietà meccaniche. Altri materiali, i quali possono essere richiesti in applicazioni specifiche, si troveranno nel paragrafo di presentazione generale del modello FE della MSS.
- c. Le condizioni di vincolo e di carico di ciascun modello FE sono spiegate direttamente nell'apposito paragrafo.
- d. La strategia per valutare gli effetti del terremoto viene eseguita come un'analisi quasi statica con un setting definito di accelerazioni, come meglio illustrato nel paragrafo 4.5.6.
- e. I risultati di tutte le analisi e le relative unità di misura [SI] sono:
 - Sollecitazioni equivalenti di Von-Mises [MPa]
 - Spostamenti totali [mm]
 - Le rotazioni [°]
 - Le forze di reazione [N]
 - I momenti di reazione [N*mm]

Nei paragrafi seguenti viene fornita un breve introduzione dei requisiti di progetto, del metodo agli elementi finiti, degli standard comuni CAE Ansys nonché delle analisi FEA da effettuare in ambiente ESO al fine di validare una progettazione strutturale di un prodotto astronomico ground-based.

4.3 MSS Requirements

La **Main Support Structure (MSS)** di MORFEO, dovendo essere installata direttamente sulla piattaforma Nasmyth A di ELT, deve rispettare tutti i requisiti stabiliti da ESO per tali tipologie di strutture/item tecnologici.



Figura 51. ELT Nasmyth A posizione in ELT

Uno dei requirement più stringenti in piattaforma Nasmyth, visto il sovraffollamento della stessa e la posizione a 26 metri dal suolo, è rappresentato dalla massa complessiva allocata allo strumento. In particolare, il modulo MORFEO, con tutto il suo payload e tutte le optomeccaniche che verranno installate su di esso, non può superare i **30000 Kg**, inclusivi del 20% di contingency. Una percentuale così alta di contingency è giustificata dal grado di incertezza relativo ad alcuni item del progetto, nonché al livello di maturità che si richiede per una fase di PDR. Infatti, per una PDR, saldature, imbullonature, piastre di fissaggio delle travi sono state considerate come carichi concentrati applicati alla struttura, con l'intento di non sottostimare il comportamento globale e, anzi, restare adeguatamente conservativi. Chiaramente anche i vincoli di natura geometrica risultano particolarmente impattanti, infatti un ulteriore requisito da rispettare è il volume di ingombro MORFEO-MICADO in piattaforma Nasmyth A. Secondo tale specifica, nessuno strumento dovrà superare il volume ad esso allocato da ESO, in tutte le configurazioni operative e in tutte le condizioni di sopravvivenza. La frequenza propria più bassa di ogni strumento scientifico che verrà installato sulla piattaforma Nasmyth deve essere superiore a **7 Hz**, ovvero più di 3 volte



della prima frequenza propria del telescopio che è pari ad **1.9 Hz**. Ciò è essenziale per disaccoppiare i modi delle strutture ed evitare che gli strumenti entrino in risonanza con il telescopio. Lo stesso approccio viene usato anche per il payload installato sulla MSS, che come requisito progettuale, dovrà avere una frequenza almeno doppia di quella della MSS. Una struttura grande come la MSS di MORFEO, inoltre, è soggetta anche a carichi da vento pari a **2 m/s** (in condizioni operazionali) oltre che a cedimenti imposti della piattaforma Nasmyth sotto il carico di tutto il suo payload scientifico.

I possibili punti di interfaccia di ogni strumento Nasmyth sono definiti da ESO nel documento “Nasmyth Platform Interfaces; ESO-286456 (CAD-135139) Revision 1”. L’eccentricità massima dei carichi, come definito nella *EN 1998-1-8 sezione 2.7*, deve essere minore del 10% della larghezza della flangia di interfaccia. In tale documento, viene anche dichiarata la possibilità di scegliere punti addizionali o aggiuntivi (tipicamente lungo le congiungenti dei punti principali), emettendo una specifica richiesta ad ESO.

Per scelta progettuale, si sono scelti solo punti principali sulla piattaforma Nasmyth, che sono identificati coerentemente con la documentazione ESO, come punti **MAIN**.

La forza limite che uno strumento installato in piattaforma Nasmyth può esercitare su un punto di attacco “MAIN” non deve superare un carico massimo, in qualunque condizione operativa ed in qualsiasi condizione di sopravvivenza, rispettivamente di:

- **500 kN** nelle direzioni di X_{AZ} e Y_{AZ} ;
- **1000 kN** di trazione e **1250 kN** di compressione nelle direzioni Z_{AZ} ;

Ogni strumento installato sulla piattaforma Nasmyth deve essere in specifica anche con le analisi di distorsione indotte dalla NP alla MSS di riferimento. Nel caso del modulo di ottica adattiva MORFEO, tali spostamenti insieme a quelli sotto carico da vento, in condizioni operazionali devono essere compensati al fine di garantire “sempre” l’allineamento dello strumento. Di seguito

viene riportato un estratto sintetico dei requirements assegnati al WP PM0 Main Structure per la progettazione meccanica della MSS.

REQUIREMENTS MORFEO PM0	
Massa totale MORFEO	30000 Kg
Massa PM0 – Main Structure	12300 Kg
Prima frequenza propria	7 Hz
Forza esercitata in direzione X_{AZ}	500 kN
Forza esercitata in direzione Y_{AZ}	500 kN
Forza esercitata in direzione Z_{AZ}	1000 KN di trazione 1250 KN di compressione
Max cedimento quasi statico NP U_x	± 0.1 mm
Max cedimento quasi statico NP U_y	± 0.1 mm
Max cedimento quasi statico NP U_z	± 0.3 mm
Carico da vento (operational)	2 m/s
Carico da vento (survival)	16 m/s

Figura 52. Requirements MORFEO PM0

Nel prossimo capitolo si mostreranno nel dettaglio le analisi FEA impostate per MORFEO al fine di verificarne l'integrità strutturale, sia sotto carichi survival che operazionali.

4.3.1 Accessibilità

Un ulteriore fattore da prendere in considerazione è l'accessibilità. L'accesso agli strumenti Nasmyth deve avvenire per i seguenti scopi:

- installazione e disinstallazione;
- messa in servizio;
- manutenzione (preventiva e correttiva).



L'accesso agli strumenti ELT avviene tramite la piattaforma Nasmyth, alla quale è possibile accedere mediante un ascensore o tramite delle rampe di scale. Devono essere presenti, infatti, scale o una combinazione di scale e passerelle, per permettere a persone e materiali di accedere ai luoghi richiesti. Tale requisito vale anche per gli strumenti scientifici. Per l'installazione e la disinstallazione, gli strumenti Nasmyth devono essere sollevati sulla piattaforma utilizzando il carro ponte presente in cupola, la cui capacità di carico ammissibile è di **20000 Kg**.

4.3.2 Condizioni ambientali

I requisiti devono essere rispettati in determinate condizioni, dette *condizioni operative nominali*.

Esistono tre tipologie di condizioni:

- **Operational condition:** quelle in corrispondenza delle quali lo strumento deve soddisfare tutti i requisiti richiesti nelle specifiche tecniche e nei documenti applicabili;
- **Functional condition:** quelle per cui lo strumento deve essere pienamente funzionante, anche se non è necessariamente conforme ai requisiti operazionali;
- **Survival condition:** sono condizioni accidentali occasionali, di differente gravità, che si verificano tra le due e le cinque volte ogni dieci anni. È importante che, qualora si verifichi un evento di questo tipo, venga garantita la sopravvivenza strutturale dello strumento in questione, il quale, non deve subire danni irreversibili rispettando le specifiche ESO.

Le tabelle riepilogative dei requirements e delle condizioni ambientali saranno riportate nel paragrafo sull'approccio FEA.

4.3.3 Sistema di riferimento e volume di ingombro

Tutte le strutture ELT, come anche la strumentazione scientifica Nasmyth, sono orientate secondo un sistema di assi cartesiani, dove per la disposizione di questi ultimi si utilizza la convenzione levogira (ovvero la regola della mano destra). L'ELT ha un sistema fisso di coordinate allineato

con l'asse geografico Nord-Sud e la verticale locale, ovvero il vettore di gravità. L'origine del sistema di riferimento è in corrispondenza dell'intersezione nominale tra gli assi di Altitude ed Azimuth del telescopio.

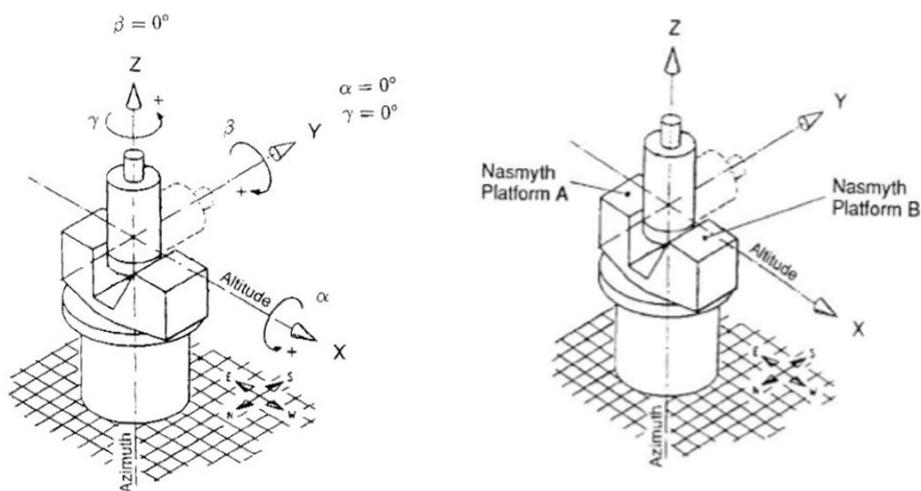


Figura 53. Orientazione del sistema di coordinate del telescopio

Tale sistema **C-SYS Globale di ELT** è utilizzato come punto di riferimento per definire i sistemi di riferimento locali mobili per l'Azimuth Structure, l'Altitude Structure e il Dome. Inoltre l'asse x punta verso l'ovest geografico, l'asse y verso sud e l'asse z punta verso lo zenit. Gli angoli di rotazione attorno a ciascun asse sono rispettivamente denominati α , β , γ . Quando l'angolo di azimut risulta nullo, ovvero $A=0$, la piattaforma Nasmyth A si trova sul lato est dell'Altitude Structure, mentre la piattaforma B sul lato ovest. Al fine di poter progettare MORFEO, è stato definito un sistema di coordinate locali **C-SYS MORFEO MICADO**, la cui origine coincide con il fuoco A1 di ELT, posizionato 6 metri al di sopra della piattaforma Nasmyth A e i cui assi sono orientati nel seguente modo: l'asse x segue la direzione della luce, l'asse z punta allo Zenith e l'asse y completa la terna tramite la convenzione della mano destra. ESO ha allocato uno spazio ben definito per MORFEO e MICADO; in tale volume d'ingombro dovrà trovarsi tutta la strumentazione, le strutture di supporto e le eventuali piattaforme di Maintenance.

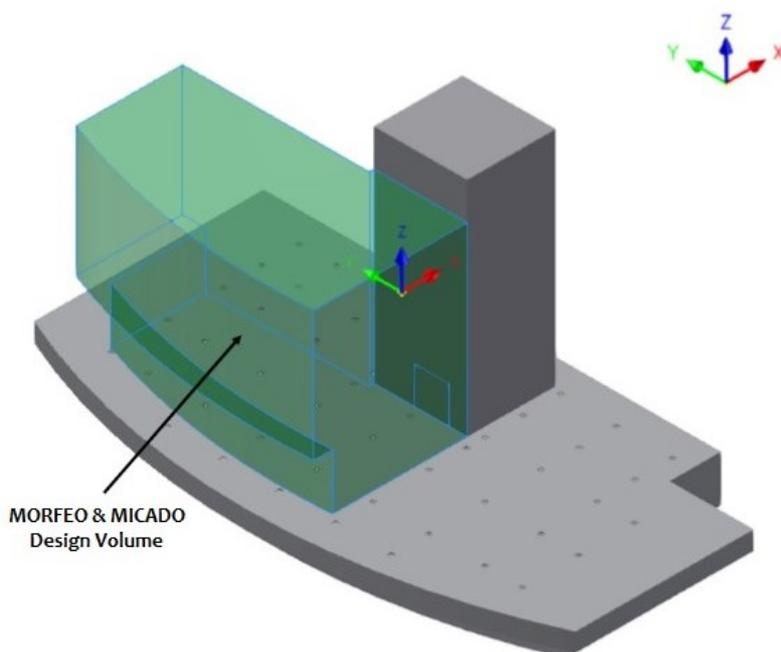


Figura 54. Volume MORFEO-MICADO ed origine del sistema di riferimento locale

4.3.4 Posizione dei punti di attacco sulla NP

I punti di attacco Nasmyth scelti per MORFEO sono esclusivamente punti **MAIN** in accordo a quanto dichiarato nel paragrafo 4.2. Le coordinate di tali punti, nel sistema di riferimento **C-SYS MORFEO-MICADO**, sono:

$$\begin{array}{l}
 \text{Main support flange \#1} \left\{ \begin{array}{l} X_1: 450,00 \\ Y_1: 0,00 \\ Z_1: -6010,00 \end{array} \right. \\
 \\
 \text{Main support flange \#2} \left\{ \begin{array}{l} X_2: 450,00 \\ Y_2: 3000,00 \\ Z_2: -6010,00 \end{array} \right. \\
 \\
 \text{Main support flange \#3} \left\{ \begin{array}{l} X_3: -4550,00 \\ Y_3: 0,00 \\ Z_3: -6010,00 \end{array} \right.
 \end{array}$$

Figura 55. Punti di attacco MAIN di MORFEO sulla piattaforma Nasmyth A

Di seguito, si riportano i punti “**MAIN**” di attacco del banco MORFEO alla piattaforma, con la relativa flangia di interfaccia, su cui lo strumento sarà installato.

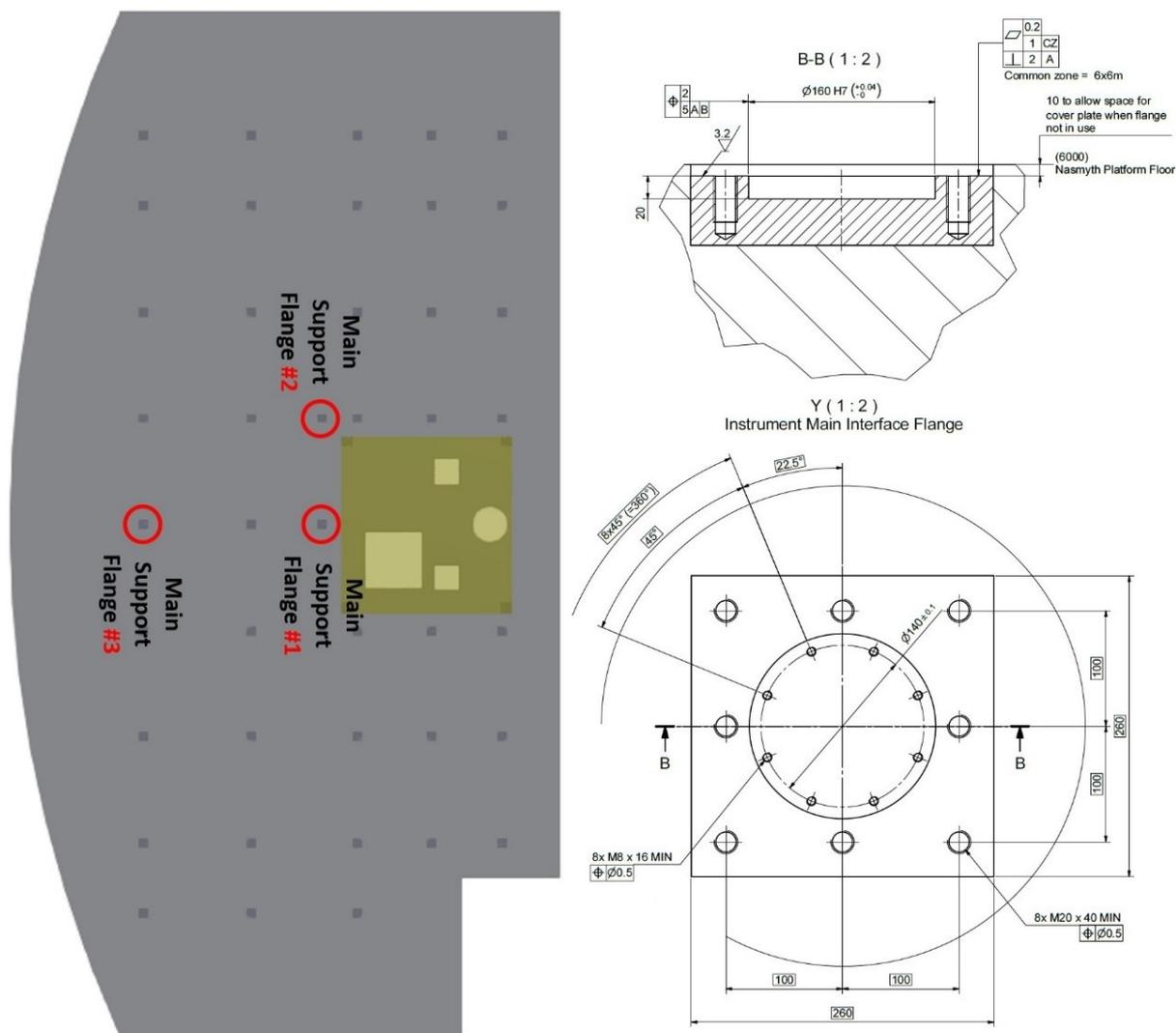


Figura 56. Nasmyth A: MORFEO punti di interfaccia (sinistra) e flangia di interfaccia (destra)

4.4 Standard FEA in ANSYS

L'analisi agli elementi finiti, o più comunemente nota come Finite Element Analysis (FEA), è una tecnica di simulazione utilizzata per risolvere problemi ingegneristici, laddove, si presenti una geometria particolarmente complessa che non permetta di ottenere soluzioni analitiche del problema. Le forze in gioco, spesso, sono funzioni dello spostamento e della velocità, di conseguenza, le equazioni che governano il moto del sistema sono generalmente equazioni differenziali alle derivate parziali. Dato che queste ultime risultano estremamente difficili da risolvere in termini matematici, si sfrutta il *Metodo degli elementi finiti*. Il Finite Element Method

(FEM) è una tecnica numerica di discretizzazione del continuo, che permette di risolvere un'equazione o un sistema di equazioni alle derivate parziali in forma integrale su un dominio finito. È necessario considerare una serie di ipotesi semplificative, al fine di rendere il problema matematicamente più semplice, garantendo pur sempre risultati che non si discostino di molto dalla realtà. Il legame tra il sistema fisico reale e la soluzione matematica è fornito proprio dal modello FEM del sistema.

Per la risoluzione delle equazioni differenziali viene discretizzato il problema, così da ottenere un sistema equivalente di equazioni risolvibile numericamente. Attraverso la **discretizzazione** è possibile descrivere una struttura con un numero finito di punti. Preso un generico corpo, esso viene scomposto in un numero finito di elementi di varia forma, detti sotto-domini, i quali costituiscono una griglia, detta **mesh**. La soluzione del problema, per ciascun elemento, è fornita dalla combinazione lineare di funzioni polinomiali, dette funzioni di forma. La soluzione è tanto più precisa, quanto maggiore è il numero di divisioni e più è elevato il grado del polinomio.

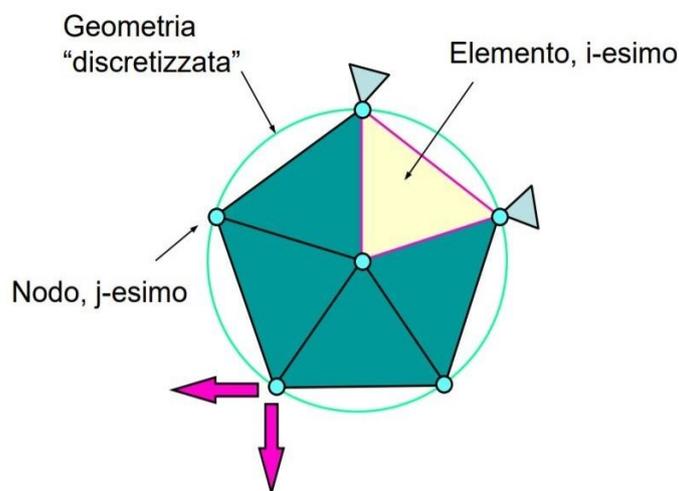


Figura 57. Discretizzazione tetraedrica del dominio

Nel processo di discretizzazione propedeutico alle analisi strutturali, per avere modelli più leggeri e tempi di calcolo più brevi, vengono spesso sviluppati “modelli FE equivalenti” ai rispettivi CAD 3-D di partenza. Tale pratica risulta essenziale quando si cerca un feedback veloce dalla struttura

e soprattutto quando si è in una fase preliminare della progettazione optomeccanica. Tutte le parti solide che compongono gli oggetti veri e propri sono sostituite da linee, superfici e punti a seconda della loro forma. In questo modo, abbiamo oggetti FE virtuali con un comportamento paragonabile ai frame solidi, ai giunti 3-D o ai pannelli reali inizialmente modellati nel CAD.

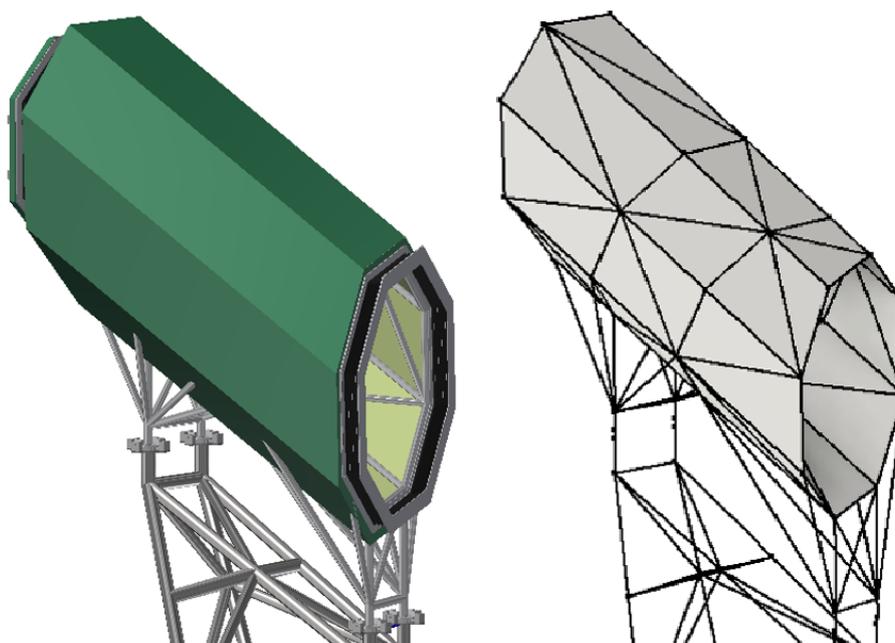


Figura 58. Confronto tra un modello CAD 3D e un modello semplificato per l'analisi FE

Proprio per eseguire un lungo processo di ottimizzazione strutturale supportato da un setting ben calibrato di analisi FE globali, è molto utile impiegare un modello FE semplificato, sostituendo alcuni elementi con oggetti computazionali più leggeri. Ad ogni modo, per l'analisi locale, data la complessità della geometria in oggetto, sono state effettuate alcune analisi dettagliate di sotto-modellazione 3-D. La buona riuscita di una semplificazione strutturale FE dipende dalla sensibilità del progettista che lavora al modello, dalla sua esperienza e dalla conoscenza approfondita del codice di calcolo su cui opera. Spesso, nel mondo FEM, ci sono molte strade per arrivare al risultato ma, non tutte, sono ugualmente percorribili. La sola esperienza e la prova di differenti soluzioni riesce ad accrescere il background tecnico dei soggetti che operano in questi ambiti della tecnica ingegneristica.



Nel modello semplificato della MORFEO_MSS, ad esempio, ogni elemento trave 1-D è allineato con l'asse geometrico della trave CAD solida in 3-D. Allo stesso modo vengono posizionati anche gli elementi piani in modo da avere la superficie 2-D sul piano di simmetria della corrispondente piastra CAD solida 3-D. Sono stati utilizzati anche elementi rigidi 1-D per simulare oggetti con un grado di rigidità superiore alla struttura in esame, oppure per collegare diverse parti tra loro o, ancora, per trasferire il carico del payload optomeccanico (o ogni altro tipo di carico utile) alla struttura di supporto. Per simulare elementi 3-D nel modello FE semplificato, il modello CAD utilizzato per il pre-processor FEA è composto da superfici, linee 3-D e punti; le informazioni geometriche mancanti, come lo spessore o le sezioni di inerzia delle travi sono state assegnate successivamente in **Ansys Mechanical** o in **Ansys SpaceClaim**.

Per le analisi locali (tecnica di submodeling) alcune parti/assiemi dell'intera struttura vengono simulate come componenti solide 3-D. Di solito sono parti di geometria molto complessa in cui le differenze tra i modelli 3-D e quelli 1-D/2-D (descritti in precedenza) sono molto significative. In questo caso, infatti, il modello CAD viene leggermente modificato (procedura di defeaturing del modello CAD per la FEA) per simulare il comportamento del sotto-modello locale importando le opportune condizioni al contorno direttamente dal modello FE globale (1-D/2-D).

Tale tecnica sarà meglio definita e spiegata, con esempi e casi applicativi, nel capitolo 6 di questo elaborato di tesi.

4.4.1 Elementi FE utilizzati in ANSYS

Tutti i modelli sono stati esportati direttamente dal software CAD (Autodesk Inventor®) al software CAE (Ansys Workbench® versione 19.2 o successive).

Per costruire il modello FE discretizzato della MORFEO_MSS sono stati utilizzati i seguenti elementi FE (secondo le prescrizioni ESO):

- L'elemento solido 3D (SOLID186) è un elemento solido 3D a 20 nodi di ordine superiore che mostra un comportamento di spostamento quadratico. L'elemento è definito da 20 nodi aventi tre gradi di libertà per nodo: traslazioni nelle direzioni nodali x , y e z . L'elemento supporta plasticità, iper-elasticità, scorrimento, irrigidimento delle sollecitazioni, grande deflessione e grande capacità di deformazione.

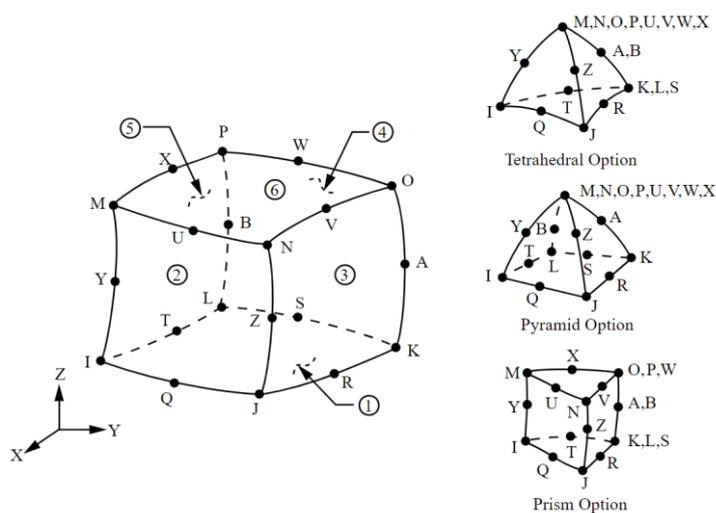


Figura 59. Elemento Ansys SOLID186

- L'elemento piano 2-D (SHELL181), adatto per l'analisi di strutture a guscio da pareti sottili a moderatamente spesse. È un elemento a quattro nodi con sei gradi di libertà su ciascun nodo: traslazioni nelle direzioni x , y e z e rotazioni attorno agli assi x , y e z .

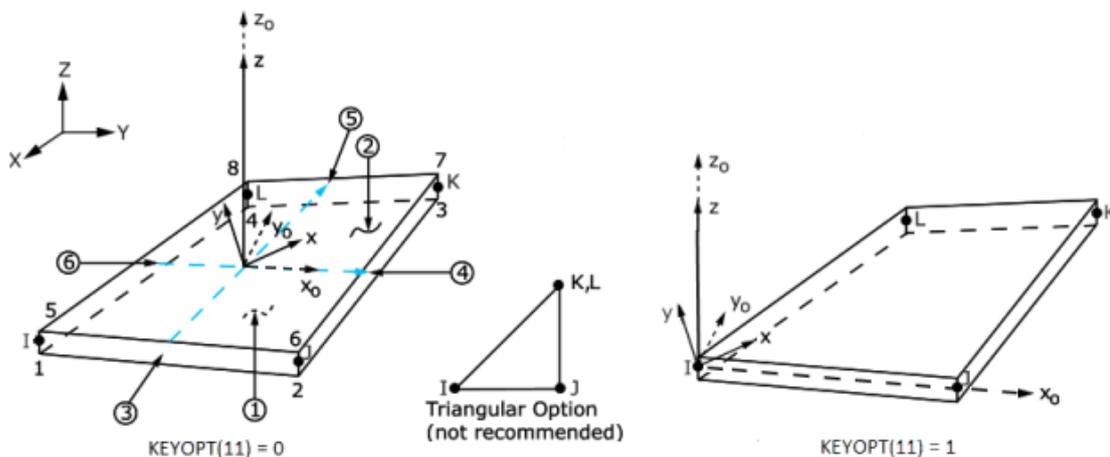


Figura 60. Elemento Ansys SHELL181

- L'**elemento trave 1-D** (BEAM188) è un elemento trave lineare, quadratico o cubico a due nodi in 3-D. BEAM188 ha sei o sette gradi di libertà su ciascun nodo. È adatto per l'analisi di strutture di travi da sottili a moderatamente tozze/spesse. L'elemento si basa sulla teoria della trave di Timoshenko che include effetti di deformazione a taglio.

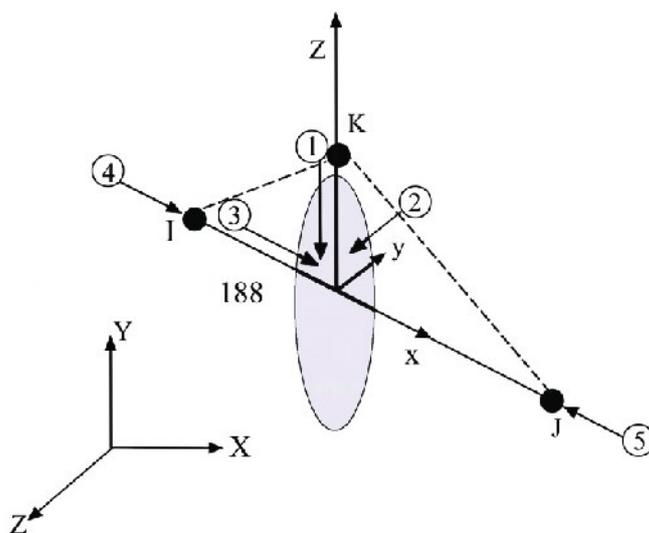


Figura 61. Elemento Ansys BEAM188

- Gli **elementi rigidi 1-D** (MPC184), sono elementi di collegamento rigido/trave, possono essere utilizzati per modellare un vincolo rigido tra due corpi deformabili o come componente rigido utilizzato per trasmettere forze e momenti in applicazioni ingegneristiche. Nel nostro caso è stato utilizzato anche per unire due differenti parti della struttura.

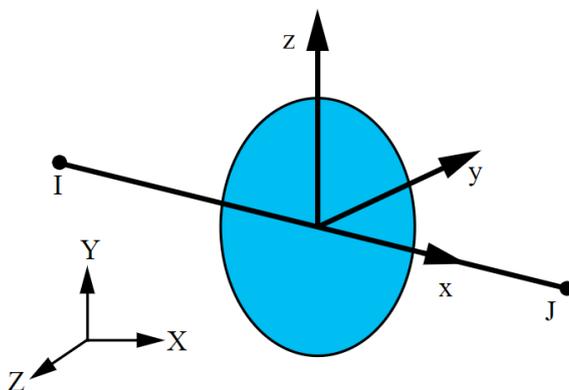


Figura 62. Elemento Ansys MPC184

- Gli **elementi mass point** (MASS21), sono elementi puntuali aventi fino a sei gradi di libertà: traslazioni nelle direzioni nodali x , y e z e rotazioni attorno agli assi nodali x , y e z . A ciascuna direzione delle coordinate è possibile assegnare una massa e un'inerzia rotativa diverse.

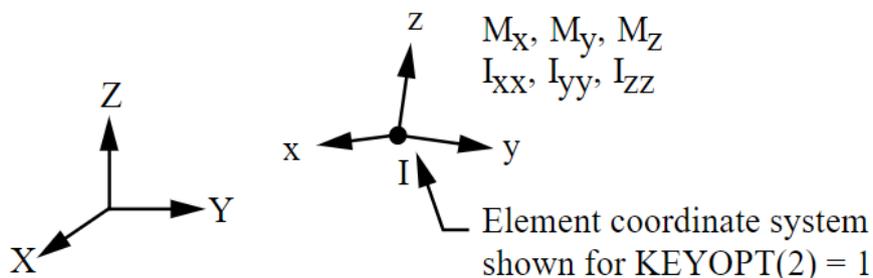


Figura 63. Elemento Ansys MASS21

4.4.2 Materiali di uso comune in ANSYS

Ci sono alcuni materiali da costruzione assegnati di default in ANSYS che sono infatti definiti “di uso comune” nell’impostazione di una verifica meccanica. Essi sono utilizzati quando i carichi e/o le prestazioni richieste al materiale non sono straordinarie; in caso contrario, potrebbe essere necessario utilizzare un materiale speciale, con proprietà meccaniche più spinte. I materiali di “uso comune” sono stati utilizzati, in primo approccio, anche per la MORFEO_MSS. In presenza di tensioni di snervamento particolarmente elevate, in fase di post-processing dei primi risultati FEA, il materiale sarà poi opportunamente rimodulato e cambiato con uno più performante.

Lo **Structural Steel**, questa la nomenclatura nel software, è una lega d'acciaio usata solitamente per costruire strutture. È caratterizzata da una resistenza a trazione e compressione media, che potrebbe essere migliorata dall'ampia gamma di forme che può assumere la sezione trasversale di un oggetto in acciaio. L'acciaio strutturale utilizzato per gli elementi che compongono la struttura principale ha le proprietà meccaniche descritte dalla tabella seguente (Figura 64).

Outline of Schematic A2, B2: Engineering Data				
	A	B	C	E
1	Contents of Engineering Data			Source
2	Material			Description
3	Aluminum Alloy			C:\Users\enzoc\Docume General aluminum alloy. Fatigue properties come from MIL-HDBK-5H, page 3-277.
4	Structural Steel			C:\Users\enzoc\Docume Fatigue Data at zero mean stress comes from 1998 ASME BPV Code, Section 8, Div 2, Table 5-110.1
*	Click here to add a new material			

Properties of Outline Row 4: Structural Steel				
	A	B	C	D E
1	Property	Value	Unit	
2	Material Field Variables	Table		
3	Density	7,85E-06	kg mm ⁻³	
4	Isotropic Secant Coefficient of Thermal Expansion			
5	Coefficient of Thermal Expansion	1,2E-05	C ⁻¹	
6	Isotropic Elasticity			
7	Derive from	Young's Modulus and...		
8	Young's Modulus	2E+05	MPa	
9	Poisson's Ratio	0,3		
10	Bulk Modulus	1,6667E+11	Pa	
11	Shear Modulus	7,6923E+10	Pa	
12	Strain-Life Parameters			
20	S-N Curve	Tabular		
24	Tensile Yield Strength	250	MPa	
25	Compressive Yield Strength	250	MPa	
26	Tensile Ultimate Strength	460	MPa	
27	Compressive Ultimate Strength	0	MPa	

Figura 64. Proprietà meccaniche Structural Steel

Questa immagine è stata estratta direttamente dalla sezione *Ansys Engineering Data*.

La **Aluminium Alloy** standard di Ansys è una lega di alluminio comune, assimilabile ad una a 2024, costituita da alluminio come metallo predominante. Altri materiali che compongono questa lega sono rame, magnesio, manganese, silicio e zinco. Grazie alla sua leggerezza e al modulo elastico inferiore rispetto all'acciaio, la lega di alluminio viene spesso utilizzata per parti non soggette a carichi pesanti. Le proprietà meccaniche della Aluminium Alloy utilizzata per questa applicazione sono mostrate nella tabella seguente (Figura 65).

	A	B	C	D	E
1	Contents of Engineering Data			Source	Description
2	Material				
3	Aluminum Alloy			General_Materials.xml	General aluminum alloy. Fatigue properties come from MIL-HDBK-5H, page 3-277.

Properties of Outline Row 3: Aluminum Alloy					
	A	B	C	D	E
1	Property	Value	Unit		
2	Material Field Variables	Table			
3	Density	2770	kg m ⁻³		
4	Isotropic Secant Coefficient of Thermal Expansion				
5	Coefficient of Thermal Expansion	2,3E-05	C ⁻¹		
6	Isotropic Elasticity				
7	Derive from	Young's Modulus an...			
8	Young's Modulus	71000	MPa		
9	Poisson's Ratio	0,33			
10	Bulk Modulus	6,9608E+10	Pa		
11	Shear Modulus	2,6692E+10	Pa		
12	S-N Curve	Tabular			
16	Tensile Yield Strength	280	MPa		
17	Compressive Yield Strength	280	MPa		
18	Tensile Ultimate Strength	310	MPa		
19	Compressive Ultimate Strength	0	MPa		

Figura 65. Proprietà meccaniche di Aluminium Alloy

4.5 Verifiche strutturali in ambiente ESO

In ambiente ESO, al fine di valutare la compliance delle strutture ai requisiti di progetto, sono richieste una serie di analisi strutturali. In questa sezione vengono introdotte tre tipologie di analisi strutturali, necessarie proprio a tale scopo:

- Analisi statica - Static Structural
- Analisi modale - Modal Eigenfrequency
- Analisi di instabilità - Eigenvalue Buckling

La **Static Structural** (analisi statica) rappresenta il kernel di ogni valutazione strutturale, infatti il modello FE progettato per questo tipo di analisi è lo stesso utilizzato anche per tutte le altre. Le differenze risiedono nelle condizioni al contorno applicate al modello nonché nei carichi esterni simulati e cambiano in base al tipo di analisi che verrà eseguita. Per ogni tipo di analisi eseguita, gli output cambiano e sono specificati nella propria sezione di work flow Ansys.

4.5.1 Analisi statica - Static Structural

L'analisi strutturale statica è utilizzata per determinare gli spostamenti, le sollecitazioni, le deformazioni, la distribuzione delle forze interne e dei momenti che si generano in una struttura o in parte di essa. In particolare, l'analisi strutturale può essere statica o dinamica, a seconda che le forze prese in considerazione abbiano intensità costante o variabile nel tempo. Per l'analisi strutturale di tipo statico, gli spostamenti sono ottenuti mediante la risoluzione della seguente equazione:

$$[K]\{u\} = \{F\}$$

avendo ipotizzato che il materiale abbia un comportamento elastico lineare, che sia valida la teoria delle piccole deformazioni, e sapendo che F è applicata staticamente, in quanto non sono considerate forze variabili nel tempo. Nella equazione precedente, abbiamo che: $[K]$ è la matrice di rigidezza della struttura, $\{u\}$ è il vettore degli spostamenti nodali e $\{F\}$ è il vettore delle forze nodali. Infine la deformazione statica totale del modello è valutata nel seguente modo:

$$U_{tot} = \sqrt{U_x^2 + U_y^2 + U_z^2}$$

Dove U_x , U_y e U_z sono gli spostamenti nodali lungo le tre direzioni x, y e z.

Per quanto riguarda il calcolo della Tensione equivalente di von Mises, avremo:

$$\sigma_{eq} = \sqrt{\frac{[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]}{2}}$$

con σ_1 , σ_2 , σ_3 sollecitazioni principali.

Solitamente le analisi statiche, in ambiente ESO, vengono eseguite sotto carico gravitazionale e applicando un carico utile opportunamente marginalizzato in modo da simulare il comportamento della struttura in condizioni sufficientemente conservative. La contingenza applicata ai carichi utili dipende dal livello di maturità della progettazione di ciascun componente.

Gli output dell'analisi strutturale statica sono:

- **Forze di reazione** sui punti di attacco NP, sotto carico gravitazionale
- **Momenti di reazione** sui punti di attacco NP, sotto carico gravitazionale
- **Sollecitazione massima equivalente di von Mises**, rispetto al limite di snervamento strutturale del materiale utilizzato
- **Spostamento massimo** a cui sono soggette la struttura ed il suo carico utile, purché conformi alle Specifiche Tecniche assegnate alla MSS.

Il calcolo del fattore di sicurezza deve essere effettuato sulla base delle prescrizioni ESO. I Safety Factor sono necessari per imporre condizioni cautelative sia per il materiale che per il design. Salvo diversamente richiesto da qualsiasi accordo sostitutivo con ESO, il **Margine di Sicurezza (MoS)** comprensivo del fattore di sicurezza relativo al design deve essere ≥ 0 :

$$\text{MoS} = \sigma_m / (\sigma \times \text{SF} \times \text{SFM}) - 1 \geq 0$$

1. σ_m limite di snervamento per materiali duttili, massima resistenza per materiali fragili
2. σ sollecitazione massima di lavoro, sollecitazione von Mises per sollecitazione duttile, sollecitazione principale massima per materiali fragili
3. SF Safety Factor, come riportato nella prima tabella di Figura 66
4. SFM Safety Factor sui materiali, come riportato nella seconda tabella di Figura 66

Loading and environmental conditions	Safety Factor (SF)
On Site Assembly, Integration	1.35
Operation, Stand-by and Maintenance	1.35
Survival, Accidental	1.1

Material	Material's Safety Factor (SFM)
Metal	1.1
Optical glass, glass-ceramic	1.4
Glue	1.4
CFRP	1.4
Concrete	1.5
Reinforcement steel	1.15

Figura 66. SF e SFM in ambiente ESO

Un approccio di verifica equivalente è la stima del "Fattore di riserva" RF (Reserve Factor) che, in questo caso, deve risultare maggiore o uguale a 1.0:

$$\mathbf{RF} = \sigma_m / (\sigma \times \mathbf{SF} \times \mathbf{SFM}) \geq 1.0$$

4.5.2 Analisi Modale - Modal Eigenfrequency

Qualunque struttura è sottoposta a forze dinamiche che causano vibrazioni, di conseguenza, tramite l'analisi modale è possibile analizzarne il comportamento dinamico. Quest'analisi permette di conoscere i modi di vibrare del sistema, ovvero quelle particolari configurazioni deformate per le quali lo spostamento di ogni punto della struttura, lasciata libera di oscillare e in assenza di smorzamento, è proporzionale in ogni istante allo spostamento di qualsiasi altro punto. La somma delle masse modali effettive per i modi calcolati, da requirement ESO, deve ammontare almeno al **90%** della massa totale della struttura lungo le tre direzioni principali.

Analiticamente viene risolto il seguente problema:

$$[\mathbf{M}]\{\ddot{\mathbf{u}}\} + [\mathbf{C}]\{\dot{\mathbf{u}}\} + [\mathbf{K}]\{\mathbf{u}\} = \{\mathbf{P}(t)\}$$

Dove $[\mathbf{M}]$ è la matrice delle masse, $[\mathbf{C}]$ è la matrice degli smorzamenti, $[\mathbf{K}]$ è la matrice delle rigidità e $\{\mathbf{P}(t)\}$ è l'eccitazione della struttura. Inoltre $\{\mathbf{u}\}$ è il vettore degli spostamenti, $\{\dot{\mathbf{u}}\}$ è il vettore delle velocità e $\{\ddot{\mathbf{u}}\}$ il vettore delle accelerazioni. (http://www.risknet-alcotra.org/rna/allegati/18-nov-fantilli_762.pdf), (http://mguler.etu.edu.tr/WB-Mech_120_Ch05_Modal.pdf.) In particolare, si fa riferimento al caso di oscillazioni libere del sistema in assenza di smorzamento, ovvero $[\mathbf{C}]=\{\mathbf{P}\}=\{\mathbf{0}\}$. Allora il sistema diventa:

$$[\mathbf{M}]\{\ddot{\mathbf{u}}\} + [\mathbf{K}]\{\mathbf{u}\} = \{\mathbf{0}\}$$

Essendo un sistema di equazioni differenziali omogenee, la soluzione è del tipo:

$$\{\mathbf{u}\} = \{\boldsymbol{\psi}\}\sin(\omega t)$$

In definitiva si ha il seguente sistema di equazioni omogenee:

$$([K] - \omega^2[M])\{\psi\} = \{0\}$$

Oltre alla soluzione banale, per cui $\{\psi\} = \{u\} = \{0\}$, ovvero in caso di assenza di moto, vi sono altre soluzioni per pulsazioni ω , detti autovalori, che soddisfano la seguente equazione:

$$\det|-\omega^2[M] + [K]| = 0$$

Il generico modo di vibrare i -esimo, ha pulsazione ω_i , periodo T_i e spostamenti:

$$\{u\}_i = \{\psi\}_i \sin(\omega_i t)$$

L'analisi modale, quindi, ci risulta molto utile per valutare le frequenze naturali, le forme modali ed il contributo di massa effettivo delle strutture in condizioni operazionali.

Per avere una conoscenza completa del comportamento globale della struttura, l'Analisi Modale viene eseguita in due modi differenti. Definendo f_{\min} come l'autofrequenza significativa più bassa e f_{REQ} come l'autofrequenza più bassa richiesta dal sottosistema:

1. In prima analisi si utilizza un payload marginato sulla struttura, al fine di valutare il rispetto del requisito, per il quale la f_{\min} deve essere maggiore di 7Hz (rif. documenti ESO):

$$f_{\min} (\text{payload marginato}) > f_{REQ}$$

Inoltre, la f_{\min} , ovvero la prima autofrequenza significativa, con payload marginato è essenziale per definire i valori da settare per le accelerazioni da terremoto, come meglio precisato nel paragrafo sull'analisi sismica (4.5.6).

2. Nella seconda analisi non si utilizza un payload marginato sulla struttura al fine di stimare il valore f_{\min} più alto della MSS che sarà poi utilizzato per calcolare il requirement per l'autofrequenza minima dei sottosistemi installati sulla MSS. In questo modo, avremo:

$$2 f_{\min} (\text{sottosistema}) > f_{\min} (\text{MSS payload netto})$$

Per tutte le analisi modali eseguite le percentuali ed i contributi di massa effettivi, rispettivamente traslatorio e rotatorio attorno agli assi principali, saranno riportati nei paragrafi specifici.

4.5.3 Analisi di instabilità - Eigenvalue Buckling

L'instabilità o Buckling è rappresentata dall'insorgere di fenomeni deformativi per lo più ortogonali alla direzione di massima compressione. L'instabilità viene in genere presentata con l'analisi della trave di Eulero, che offre una immediata comprensione del fenomeno. Il meccanismo è sempre legato all'insorgere di fenomeni di carico a flessione (locali o globali) laddove si presenta uno stato di compressione più o meno diffuso. Non necessariamente l'instabilità coinvolge l'intera struttura, ma spesso può localizzarsi in singoli componenti particolarmente compressi staticamente o dinamicamente.

Seguendo le specifiche ESO, viene eseguita anche un'analisi di instabilità al fine di valutare il comportamento della MSS di MORFEO e dei suoi componenti. I risultati di questo tipo di analisi sono i valori numerici dei moltiplicatori di carico, che rappresentano, in termini semplici, “quante volte il carico deve essere aumentato affinché la struttura raggiunga il cedimento”. Si può notare che, in ogni caso, questi valori devono essere maggiori di **10** e/o opportunamente marginati quando richiesto. Infatti, valori prossimi o inferiori a 1 sono rappresentativi di una struttura troppo debole. Avere almeno un ordine di grandezza maggiore è un concetto base di ogni buon design meccanico.

4.5.4 Analisi da vento - Wind analysis

Un'analisi da vento studia l'impatto degli effetti del vento sulle strutture. Si effettua, in questa fase del progetto, imponendo gli effetti statici (carico esterno) del vento sulla MSS di MORFEO. Partendo dal modello sviluppato per l'analisi statica e secondo le specifiche tecniche assegnate alla MSS, per verificare la conformità strutturale sotto carichi da vento, vengono effettuate due tipologie di analisi semplificate:

- **Operational conditions** (velocità media del vento, 2 m/s)
- **Survival conditions** (velocità media del vento, 16 m/s)

Le altre specifiche per i casi illustrati sono riportate nella figura seguente.

	Operational	Functional	Survival
Air density	0.87kg/m ³ (Median)		0.92kg/m ³
Air Pressure	712 mbar ± 50 mbar		N/A
Air Temperature	0°C to +15°C	-5°C to +20°C	-10°C to +25°C
Air temperature gradient at night time	-0.55°C/h to +0.5°C/h	-1.0 °C/h to +1.4°C/h	-10.0°C/h to +10.0°C/h (over 30 min) -5.0°C/h to +5.0°C/h (over 1 h)
Relative Humidity range	5% to 80%		3% to 100% with condensation
Average wind speed	<2 m/s	<3 m/s	<16 m/s
Sky temperature	-50 °C		

Figura 67. Condizioni operative nominali per gli strumenti Nasmyth

Nelle due condizioni operative distinte, sulla MSS, vanno eseguite due analisi di distorsione indotta considerando la velocità media del vento e la densità dell'aria nelle seguenti direzioni:

- +Y agente sul lato destro di MORFEO
- +X agente sul lato esterno di MORFEO

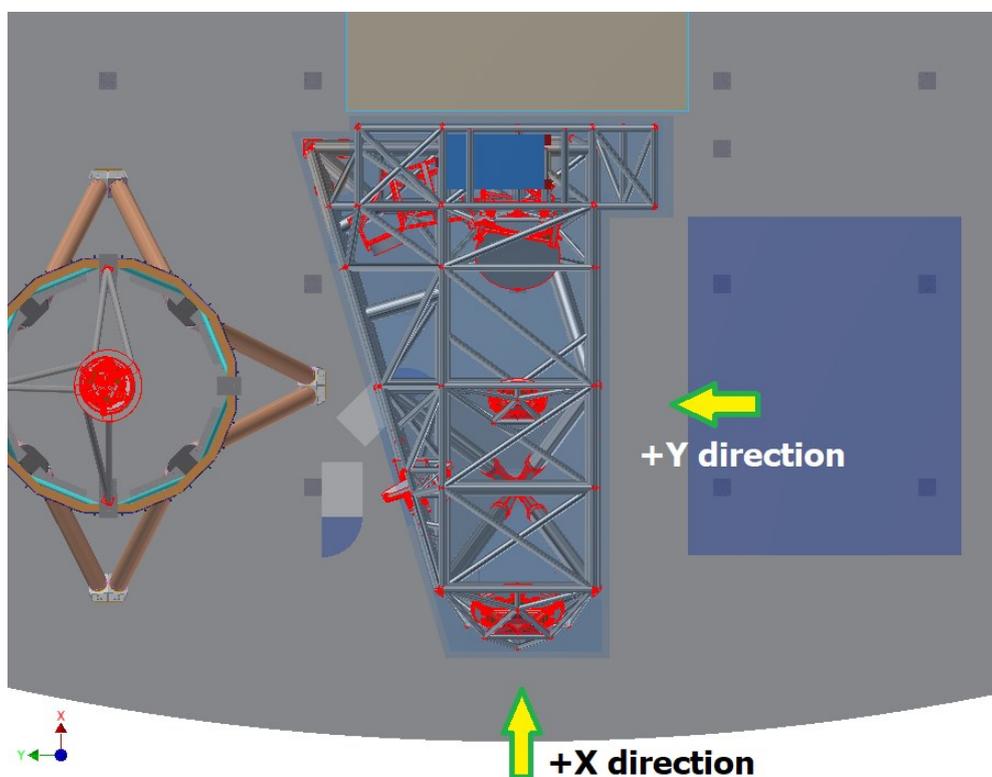


Figura 68. Direzioni del vento in NP

I carichi esterni vengono valutati partendo dalla velocità del vento e dalla densità dell'aria, diverse nelle due condizioni di test, calcolando la **resistenza aerodinamica** della struttura (R_a).

$$R_a [N] = \frac{1}{2} \rho v^2 \times A_{\text{sect}} \times C_R$$

dove:

- ρ è la densità dell'aria [kg/m^3]
- v è la velocità media del vento [m/s]
- A_{sect} è l'area della sezione normale (L alla direzione dei carichi)
- C_R è il coefficiente di resistenza aerodinamica dell'area di riferimento rispetto ai flussi di vento

Nelle simulazioni eseguite sulla MSS, poiché le superfici in valutazione sono normali alla direzione del vento, si ha sempre $C_R = 1$. Quando la superficie su cui viene applicato il carico non è perpendicolare alla direzione del carico da vento, andrebbe abbassato il valore di C_R .

Gli output di un'analisi da vento in condizioni operative, ovvero gli spostamenti e le rotazioni di ciascun elemento optomeccanico, vengono utilizzati per verificare la stabilità globale del sistema.

Gli output dell'analisi da vento in condizioni di sopravvivenza sono invece utilizzati per verificare il rispetto dei limiti di sopravvivenza della MSS.

4.5.5 Distorsione indotta dalla NP - Induced Distortion Analysis

L'**Induced Distortion Analysis** studia l'impatto delle distorsioni indotte dalla Piattaforma Nasmyth alla MORFEO MSS. Tale verifica FEA si effettua imponendo ai punti di attacco delle specifiche condizioni al contorno, ovvero un pattern predefinito di spostamenti ai vincoli FE tra Nasmyth Platform e MSS. Sulla base FEM sviluppata per l'analisi statica e secondo le specifiche tecniche della MSS, l'analisi della distorsione indotta viene eseguita imponendo solo su una particolare configurazione statica equivalente, che rappresenta il worst case ingegneristico di prova. Partendo dagli spostamenti definiti nell'elenco seguente e mostrati anche nella prossima figura, gli output per l'analisi della distorsione indotta dalla Nasmyth sulla MSS, ovvero gli

spostamenti e le rotazioni di ciascun elemento optomeccanico, vengono utilizzati per verificare la stabilità globale del sistema in condizioni operative.

- **Point_1** → D_x 0.1 mm, D_y -0.1 mm, D_z 0 mm
- **Point_2** → D_x 0.1 mm, D_y 0.1 mm, D_z 0 mm
- **Point_3** → D_x -0.1 mm, D_y -0.1 mm, D_z 0 mm

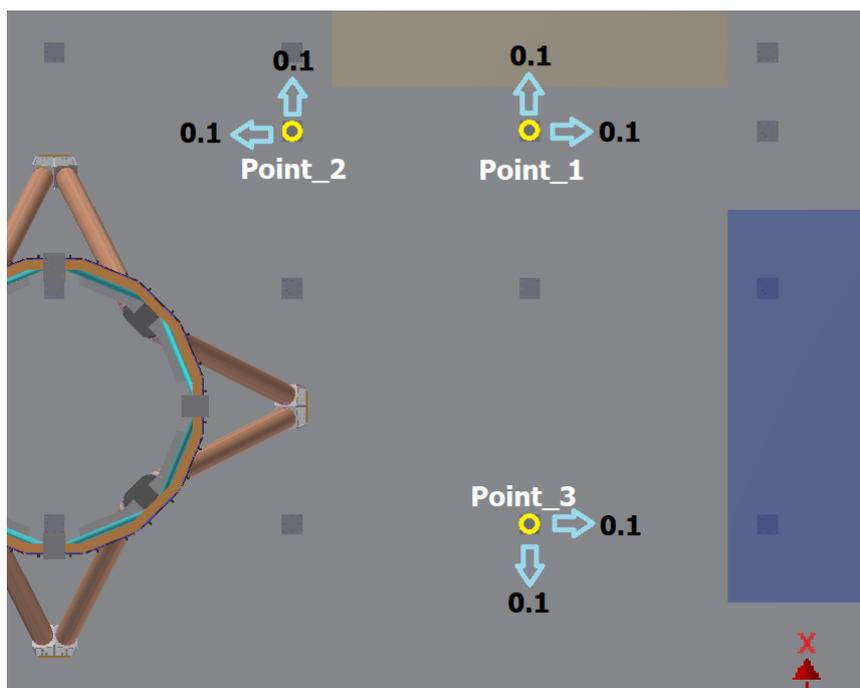


Figura 69. Spostamento imposto sui punti di attacco NP

4.5.6 Analisi Sismica - Earthquake analysis

Prima di introdurre l'analisi sismica, in ambiente ESO, è necessario fare una distinzione tra struttura principale di supporto (**MSS, Main Support Structure**) e struttura di un sottosistema.

La **MSS** è una struttura meccanica "principale" di supporto, collegata direttamente al suolo. Nelle regioni esposte ai terremoti l'azione sismica è definita al livello del suolo; esempi di struttura principale sono gli edifici, le strutture principali del telescopio, gli strumenti fissati al suolo. Inoltre una "Main Support Structure" è una struttura che può supportare uno o più sottosistemi;

La struttura di un sottosistema, **Subsystem Structure**, è una struttura meccanica fisicamente collegata e supportata da una MSS. Le azioni sismiche a livello del suolo non possono essere

applicate direttamente ai sottosistemi in caso di effetti di amplificazione dinamica. Esempi di sottosistema possono essere gli strumenti scientifici, le optomeccaniche, i cabinet. Di seguito è riportato un diagramma di flusso che illustra la procedura ESO di verifica di un sottosistema:

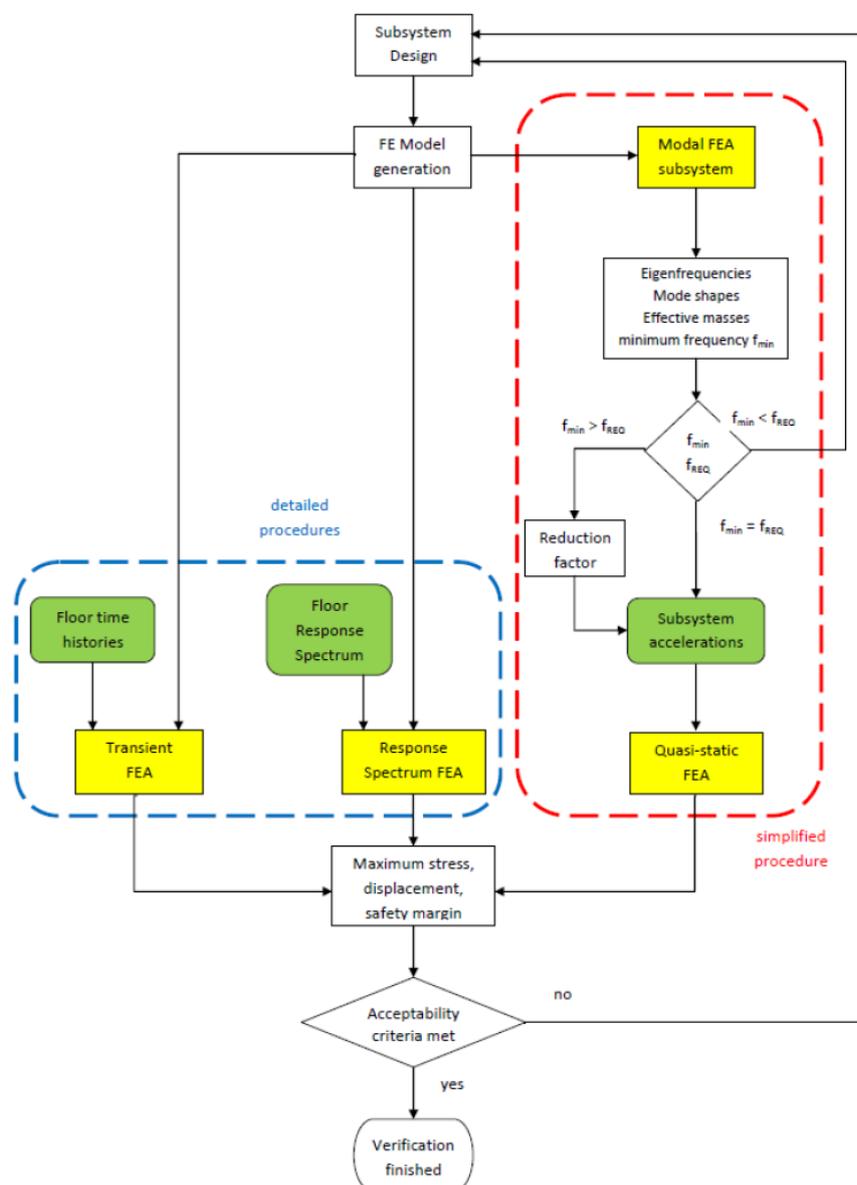


Figura 70. Procedura ESO di verifica di un sottosistema

Nel caso della **MSS di MORFEO** si fa riferimento ad un “sottosistema” anche se struttura principale di uno strumento scientifico; inoltre essendo tale sistema disaccoppiato dinamicamente dal telescopio (grazie alla sua prima frequenza propria 3 volte più alta di quella di ELT), le accelerazioni calcolate possono essere applicate nel baricentro del modello FE in modo quasi-

statico equivalente. In caso contrario, bisognerebbe effettuare analisi secondo la “**procedura dettagliata**” per tener conto dell’accoppiamento dinamico e degli effetti di amplificazione tra l’MSS ed il telescopio.

Le accelerazioni sismiche quasi-statiche, da applicare alla struttura del sottosistema, dipendono dalla frequenza propria significativa più bassa calcolata per il sottosistema f_{min} , e dalla frequenza propria più bassa richiesta per il sottosistema f_{REQ} . Vi sono tre casi che si possono presentare:

1. $f_{min} < f_{REQ}$: il requisito relativo alla frequenza propria del sottosistema non è rispettato, quindi è necessaria una riprogettazione del sottosistema;
2. $f_{min} = f_{REQ}$: il requisito è soddisfatto e le accelerazioni quasi-statiche possono essere applicate al sottosistema;
3. $f_{min} > f_{REQ}$: anche in questo caso il requisito relativo alla frequenza propria del sottosistema è soddisfatto, e le accelerazioni quasi-statiche del sottosistema possono essere moltiplicate per l’opportuno fattore di riduzione, prima di essere applicate al sottosistema.

Utilizzando il modello strutturale FE del sottosistema si devono analizzare le deformazioni statiche e le sollecitazioni massime di Von Mises. L’effetto massimo dell’azione sismica ($A_{Ed1}, A_{Ed2}, A_{Ed3}$), dovuto alle tre componenti ortogonali di accelerazione, è calcolato con la regola della combinazione percentuale:

$$\text{a) } A_{Ed1} = \pm E_{dx} \pm 0.3E_{dy} \pm 0.3E_{dz}$$

$$\text{b) } A_{Ed2} = \pm 0.3E_{dx} \pm E_{dy} \pm 0.3E_{dz}$$

$$\text{c) } A_{Ed3} = \pm 0.3E_{dx} \pm 0.3E_{dy} \pm E_{dz}$$

Dove il \pm significa “da combinare con”, E_{dx} è l’accelerazione sismica quasi-statica in direzione x orizzontale, E_{dy} è l’accelerazione sismica quasi-statica in direzione y orizzontale ed E_{dz} è l’accelerazione sismica quasi-statica in direzione z verticale.

Il massimo effetto sismico dovuto all' A_{Ed} è il caso peggiore fra tutte le combinazioni di carico possibili:

$$A_{Ed} = \max(A_{Ed1}, A_{Ed2}, A_{Ed3})$$

Di conseguenza, nel caso in esame della MSS di MORFEO, viene effettuata **un'analisi sismica semplificata** non tenendo conto dello spettro di risposta del telescopio.

Le accelerazioni sismiche quasi-statiche da applicare alla struttura, nelle tre direzioni, sono state ottenute effettuando una combinazione lineare delle tre equazioni precedenti. Nella tabella seguente (Figura 71) sono riportati i valori di accelerazione iniziali per gli strumenti Nasmyth, evidenziati nel rettangolo giallo, per l'analisi sismica.

	Operational	Functional	Survival
Air density	0.87kg/m ³ (Median)		0.92kg/m ³
Air Pressure	712 mbar ± 50 mbar		N/A
Air Temperature	0°C to +15°C	-5°C to +20°C	-10°C to +25°C
Air temperature gradient at night time	-0.55°C/h to +0.5°C/h	-1.0 °C/h to +1.4°C/h	-10.0°C/h to +10.0°C/h (over 30 min) -5.0°C/h to +5.0°C/h (over 1 h)
Relative Humidity range	5% to 80%		3% to 100% with condensation
Average wind speed	<2 m/s	<3 m/s	<16 m/s
Sky temperature	-50 °C		
Ozone Concentration	<180µg/m ³		
Dust and Sand	ISO 7.2 (median) and ISO 8 (90% percentile), according to EN ISO 14644-1: 1999.		
Aggressive Atmosphere	NO ≤ 3ppb, NO ₂ ≤ 3ppb, SO ₂ ≤ 3ppb		
Vibration and Acoustic Noise	See Sec. 7.6 of AD3		
Accelerations	See Sec 3.2.2 of AD3		
Earthquake (expressed in {X _{AZ} , Y _{AZ} , Z _{AZ} }) in g	N/A		ax=±3.6g, ay=±3.6g, az=±3.6g Quasi-static

Figura 71. Valori di accelerazione iniziali per simulazioni di Earthquake

Il valore di accelerazione quasi statica è pari a **3.6g** nelle tre direzioni. Combinando linearmente i **Load Factors**, si ottengono **24 Load Cases** per l'analisi sismica quasi-statica semplificata. Nello

specifico lungo la direzione z si va sottrarre algebricamente l'aliquota relativa alla gravità (-1 g), applicando un'accelerazione equivalente lungo tale asse. Il grafico di Figura 72, estratto da una nota tecnica ESO, correla strettamente l'accelerazione da imporre alla prima frequenza propria della struttura in esame. I valori di accelerazione nell'analisi di Earthquake risultano ridotti rispetto a quelli precedentemente definiti come “valori di accelerazione iniziali” da **3.6 g** in ogni direzione, secondo la nuova tabella di Figura 73.

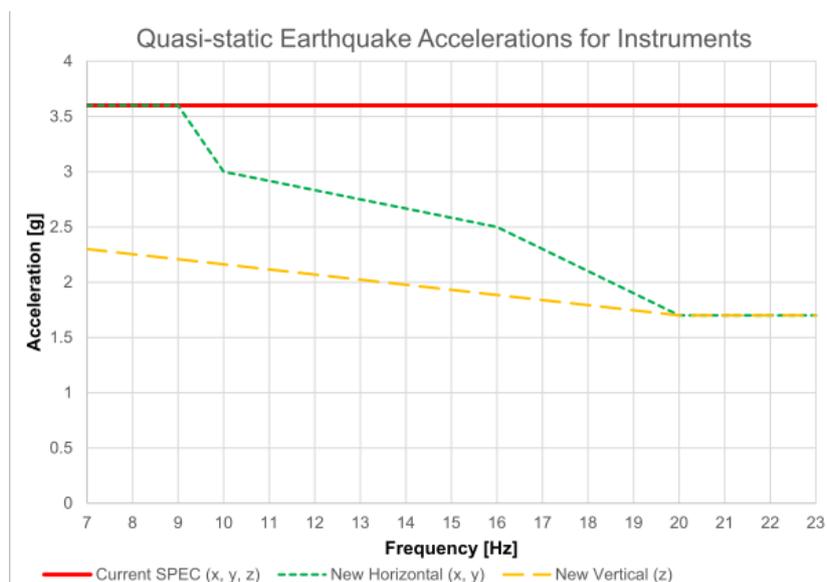


Figura 72. Correlazione Accelerazioni quasi statiche – prima frequenza propria strutture

INS 1st Eigenfrequency [Hz]	Quasi-static acceleration		
	Current SPEC (x, y, z) [g]	New Horizontal (x, y) [g]	New Vertical (z) [g]
7	3.6	3.6	2.3
8	3.6	3.6	2.25
9	3.6	3.6	2.21
10	3.6	3.00	2.16
11	3.6	2.92	2.12
12	3.6	2.83	2.07
13	3.6	2.75	2.02
14	3.6	2.67	1.98
15	3.6	2.58	1.93
16	3.6	2.50	1.88
17	3.6	2.30	1.84
18	3.6	2.10	1.79
19	3.6	1.90	1.75
20	3.6	1.7	1.7
21	3.6	1.7	1.7
22	3.6	1.7	1.7
23	3.6	1.7	1.7

Figura 73. Nuovi valori di accelerazione per Earthquake



I limiti massimi per le forze di reazione e i momenti per i punti di attacco sulla piattaforma Nasmyth sono definiti in un altro documento ESO. La forza esercitata da uno qualsiasi degli strumenti Nasmyth su qualsiasi punto di attacco “**MAIN**” non deve superare un carico limite di:

- Forza: **500 kN** nelle direzioni X_{Az} e Y_{Az}
- Forza: **1000 kN** di trazione e **1250 kN** di compressione nelle direzioni Z_{Az}

Ciò si applica in qualsiasi configurazione operativa e in qualsiasi condizione di sopravvivenza (carichi sismici, carichi del vento, ecc.).

Le flange devono essere caricate con le forze dirette al centro delle stesse per evitare momenti locali. L'eccentricità massima dei carichi deve essere **< 10%** della larghezza massima della flangia.

Per il **calcolo delle forze di reazione sulle flange NP** deve essere considerato, in tutti i casi di carico, compresi i casi di sopravvivenza e di carico accidentale, un fattore di sicurezza **SF = 1.3**, secondo le specifiche ESO ed i requirements di PM0.

I risultati dell'analisi sismica quasi-statica semplificata sono:

- **Forze di reazione sui punti di attacco**
- **Momenti di reazione sui punti di attacco**
- **Sollecitazione equivalente massima di von Mises**, valutata in condizioni survival
- **Spostamento massimo**, a cui è sottoposta la struttura sotto carico sismico pur garantendo la sua integrità nonché quella del suo payload

Naturalmente la sollecitazione equivalente massima di von Mises deve rispettare il calcolo del fattore di sicurezza SF precedentemente illustrato nel paragrafo di analisi statica (paragrafo 4.5.1).

5. MORFEO MSS DESIGN & FEA

In questo capitolo è presentata, in dettaglio, la **progettazione meccanica** e la **validazione strutturale FEA** della MSS di MORFEO **approvata da ESO** durante la Preliminary Design Review, sotto la **leadership di PM0**. Nel primo paragrafo non mancherà una breve introduzione al design CAD progettato da PM0 al fine di chiarire al meglio anche tutti gli aspetti caratteristici legati al payload installato sulla MSS. Tutte le verifiche FEA, presentate in questo capitolo, investigheranno il comportamento della **MSS** a livello “**globale**”. Il comportamento locale ovvero la validazione strutturale di giunti, sezioni geometriche particolarmente differenti tra CAD 3-D e modellazione FE 2-D/1-D, sarà un aspetto affrontato nel prossimo capitolo sul submodeling FEA. Come già precisato all’inizio di questa tesi, in diversi casi, ma in modo più frequente all’interno di questo capitolo e del prossimo, si noterà la presenza del nome MAORY anziché MORFEO nel riferirsi al modulo di ottica adattiva per ELT. È stato scelto, per tutto questo elaborato di tesi, di utilizzare il nome più aggiornato per lo strumento (MORFEO viene assegnato come nuovo nome ad agosto 2022) ma, coerentemente con quanto consegnato ad ESO e riportato in molteplici articoli scientifici, di richiamare modelli FEM e CAD con la loro nomenclatura originale, utilizzando, pertanto, la dicitura MAORY e non MORFEO. La cosa fondamentale è sapere che ci si riferisce sempre allo stesso progetto / item tecnologico.

5.1 MORFEO MSS: lo sviluppo meccanico

In questo primo paragrafo si presenta, rapidamente, l'evoluzione e la filosofia progettuale alla base delle scelte effettuate per la costruzione e lo sviluppo dei modelli CAD e FEM della MORFEO Main Support Structure (MORFEO MSS). Tali modelli saranno essenziali per certificare il grado di maturità del design meccanico nonché la compliance strutturale dell'ultima configurazione proposta ad ESO. Il punto di partenza per lo sviluppo di una progettazione meccanica, in ambiente

astronomico ground-based, è rappresentato dalla scelta del disegno ottico. Nella figura seguente viene mostrato il design ottico, nel suo ingombro generale, le nuove posizioni nonché il numero e nomenclatura degli elementi ottici impiegati. Il progetto meccanico, a guida PM0, sviluppato nel secondo quarto del 2020 (2Q20) “**fitta**” perfettamente questa soluzione ottica chiamata “**MMS**” “**MAORY Mirror System**”, nella sua versione completa. Questa versione completa del design ottico MMS è denominata per esteso: **20200417_MAORY_baseline**.

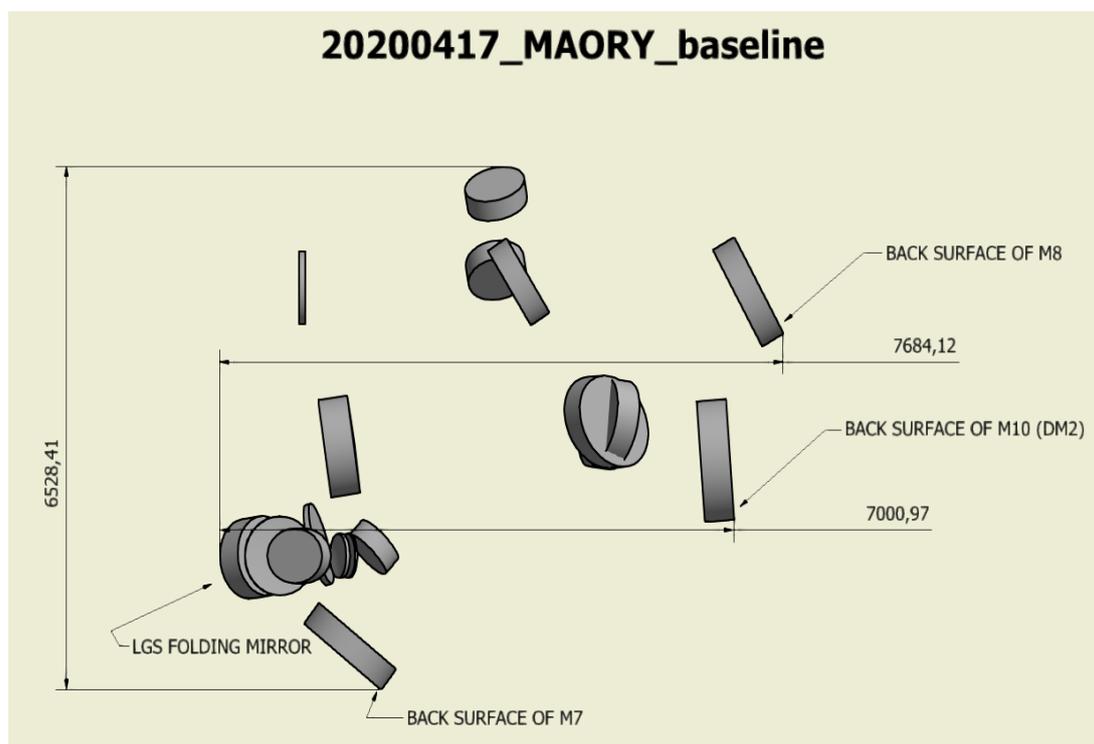


Figure 74. MMS optical design (2020): MAORY Mirror System optical design

Il disegno ottico preso a riferimento, sviluppato ad inizio 2020 (1Q20) per il modulo MORFEO, ha gettato le basi per lo sviluppo del progetto meccanico preliminare che, è stato poi successivamente ottimizzato in parallelo all’affinamento del layout ottico, con degli aggiustamenti nell’ordine degli 80-100 mm. Il processo di progettazione meccanica, di un item, segue il **diagramma di flusso**, presentato nell’introduzione di questa tesi e riportato nuovamente di seguito, in cui dall’idea concettuale di un design, attraverso vari step ben definiti, si può giungere alla validazione strutturale del modello creato. Se ciò non avviene per una qualsiasi condizione di

verifica del modello, sia essa operativa o di sopravvivenza, il progetto va reinterpretato. Il livello a cui si deve intervenire per un re-design dipende dall'impatto che le modifiche hanno sul progetto: se esse sono molto impattanti forse va rivisto addirittura il concetto altrimenti se sono modifiche minori potrebbe essere rivisto localmente il design di alcune parti.

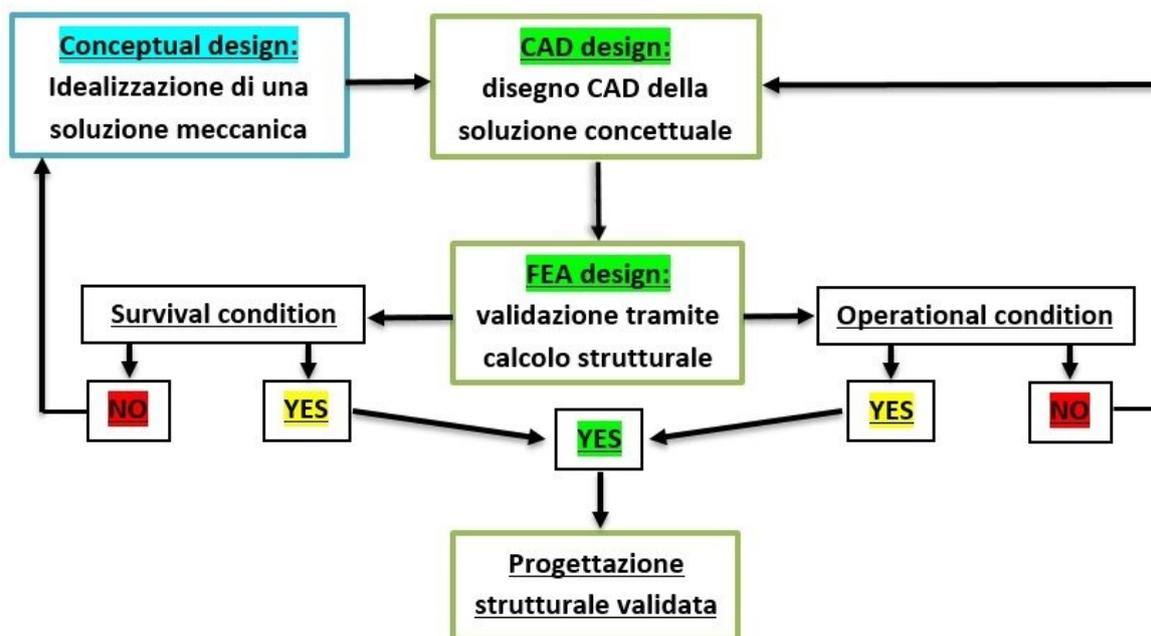


Figura 75. Schema validazione strutturale

La versione definitiva, presentata in PDR, è frutto proprio di un re-design di una **versione concettuale** e validata per carichi survival, della MSS di MORFEO, la **MSS_Type_1**.

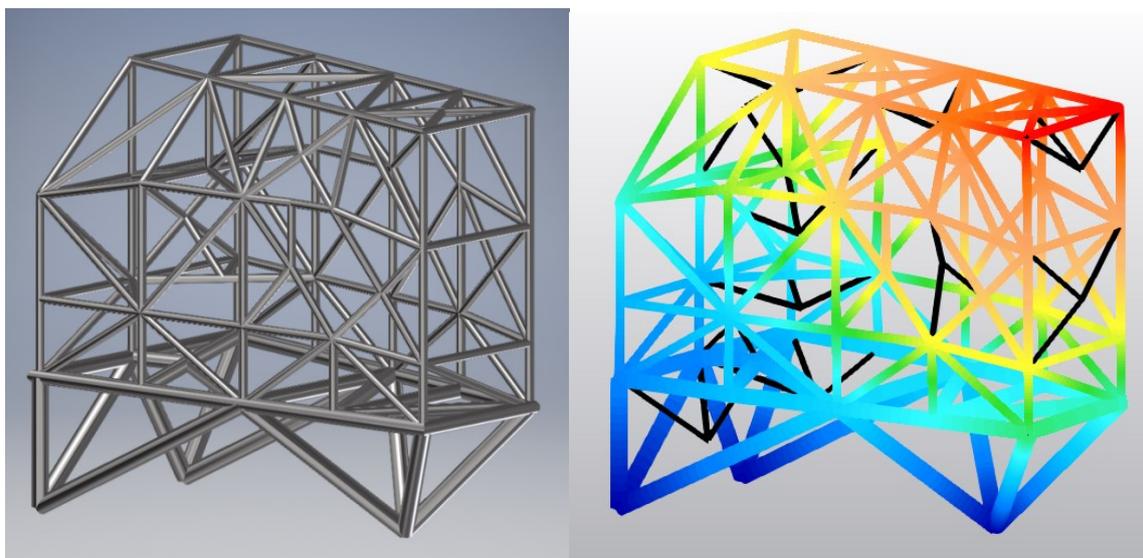


Figura 76. MSS_Type_1: Design concettuale CAD & FEM

Il design approvato in PDR infatti, adotta la stessa filosofia di "**struttura a traliccio 3D**" usata per il design concettuale mostrato in Figura 76. Questo progetto iniziale fu mostrato anche all'ESO nel febbraio del 2020 a Garching in Germania, dando il via formalmente alla fase di sviluppo del design preliminare dell'intero strumento MORFEO.

Da questa prima versione, è stato sviluppato un modello **CAD 3D** della MSS che includesse:

1. uno schema di collegamento a terra, interfaccia tra MORFEO e NP;
2. una filosofia di smontaggio della struttura, siccome parliamo di un item con dimensioni di overall significative (8 x 7 x 5) m;
3. una strategia di integrazione dei vari componenti optomeccanici;
4. una procedura, seppur concettuale, di accessibilità alla struttura;
5. le dovute verifiche per garantire le adeguate performance meccaniche sia sotto carichi operazionali che survival.

Un CAD 3D preliminare che implementasse tutto ciò è sviluppato da PM0 "in house" e inviato all'ESO nel luglio del 2020. Delle immagini rappresentative della **MSS_Type_3.3** sono mostrate di seguito. Inizia a maturare l'idea di implementare delle strutture addizionali alla MSS, le **OSS**.

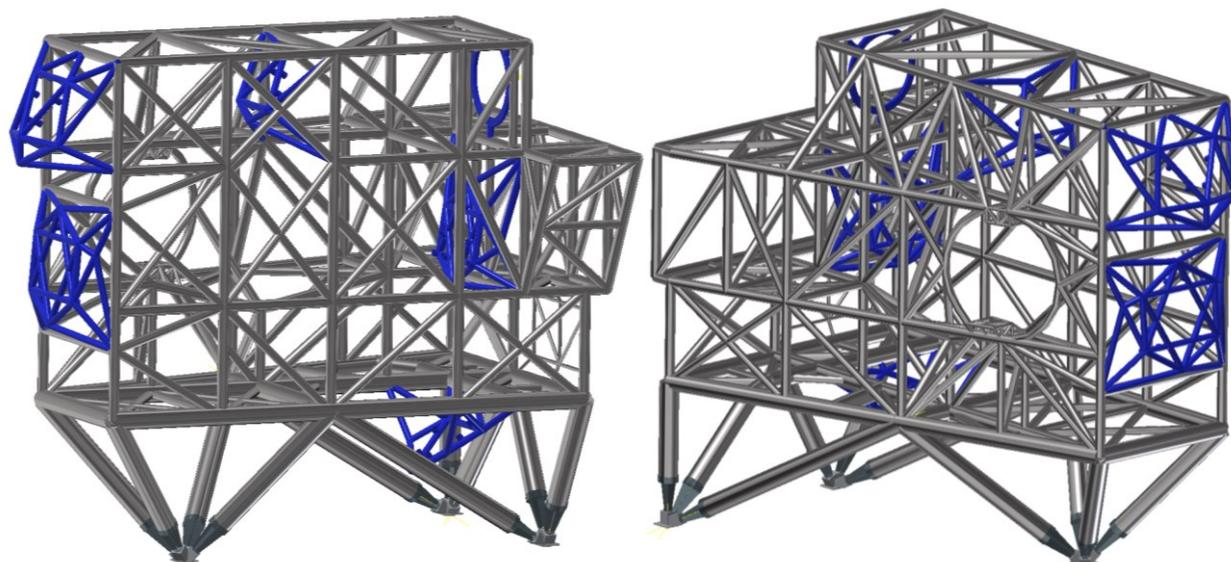


Figura 77. MSS_Type_3.3: versione CAD pre-PDR

Le **OSS (Optomechanical Support Structure)** sono quegli item meccanici atti al supporto e alla regolazione delle optomeccaniche installate sulla MSS (in blu in Figura 77 e in verde in Figura 8). Proprio, ad esempio, sulla questione regolazioni aggiuntive delle OSS si fonderà un altro re-design di questi supporti. Contestualmente, come è possibile immaginare, anche i modelli FEM di queste strutture venivano raffinati. Si andava sempre di più a vagliare ogni strada che potesse togliere eventuali dubbi sulla bontà del modello FE sviluppato, per gli scopi che ci si era prefissati, nonché ad aggiungere sempre meno approssimazioni “concettuali” classiche dei **modelli FE agili** e snelli. Tutto quello che restava “approssimato” sia a livello CAD che FEM, si inseriva in un discorso di ottimizzazione utile alla prossima fase di lavoro la FDR (Final Design Review) e veniva opportunamente tracciato. I vari re-design hanno tenuto conto sia dei feedback strutturali che giungevano dalla FEA sia delle interfacce da rispettare con gli altri sottosistemi di MORFEO. Si ricorda, infatti, che la MSS è un sistema che ha la funzione di ospitare su di essa numerosi sottosistemi.

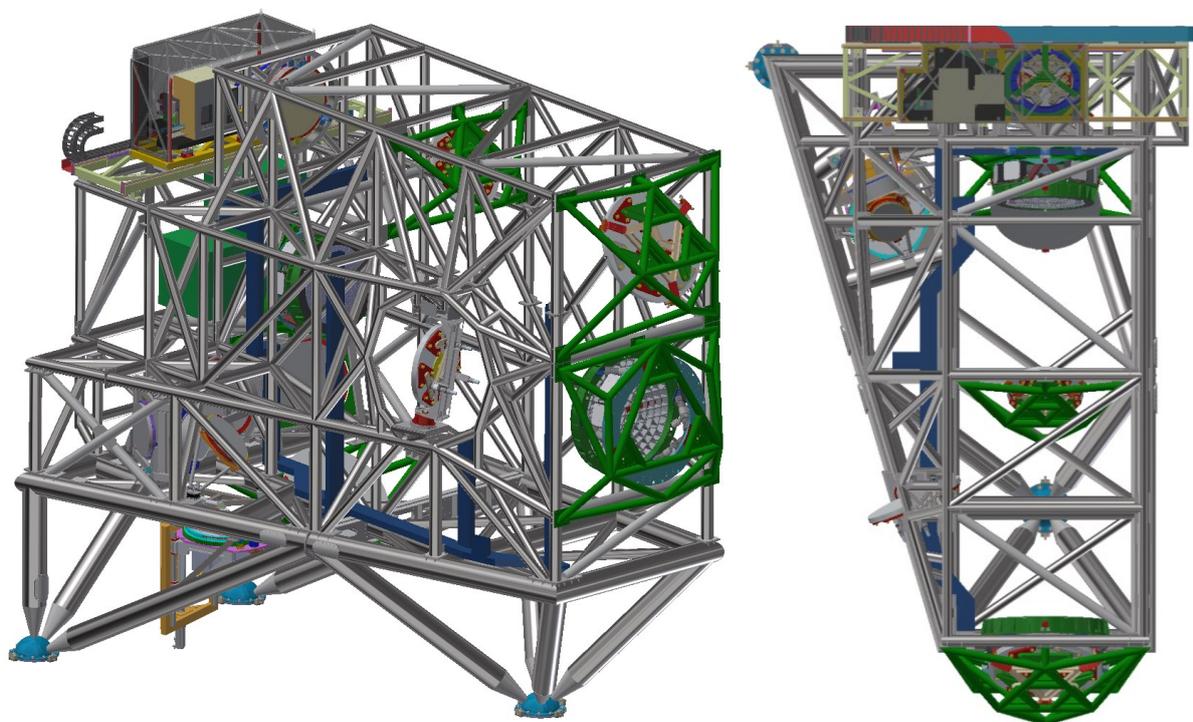


Figure 78. 3D modello CAD MORFEO MSS

Da qui è chiaro che lo sviluppo progettuale di un oggetto complesso come la MSS comporta interazioni e co-Engineering con altri gruppi di lavoro, i quali operano su differenti parti dello strumento. La MORFEO MSS è dotata di 3 flange di montaggio che consentono di installare la struttura direttamente sulla piattaforma Nasmyth A di ELT. Le coordinate di questi punti principali di appoggio, definiti MAIN, sulla Piattaforma Nasmyth, sono riportate nel paragrafo 4.3.4 di questo documento.

La MSS è suddivisa in più parti separate e viene assemblata tramite flange di collegamento con bulloni e pin di reference per aumentare la precisione dei collegamenti. Nell'immagine seguente le strutture verdi, evidenziate con dei cerchi gialli, sono le **OSS**, ovvero le strutture di supporto delle Optomeccaniche. Queste strutture sono necessarie per accogliere *accuratamente* gli elementi ottici. Gli elementi ottici ospitati sono: **SP** (Smith Plate), **M6** (Mirror 6), **M7** (Mirror 7), **M8** (Mirror 8), **M9/DM1** (Deformable Mirror 1), **M10/DM2** (Deformable Mirror 2).

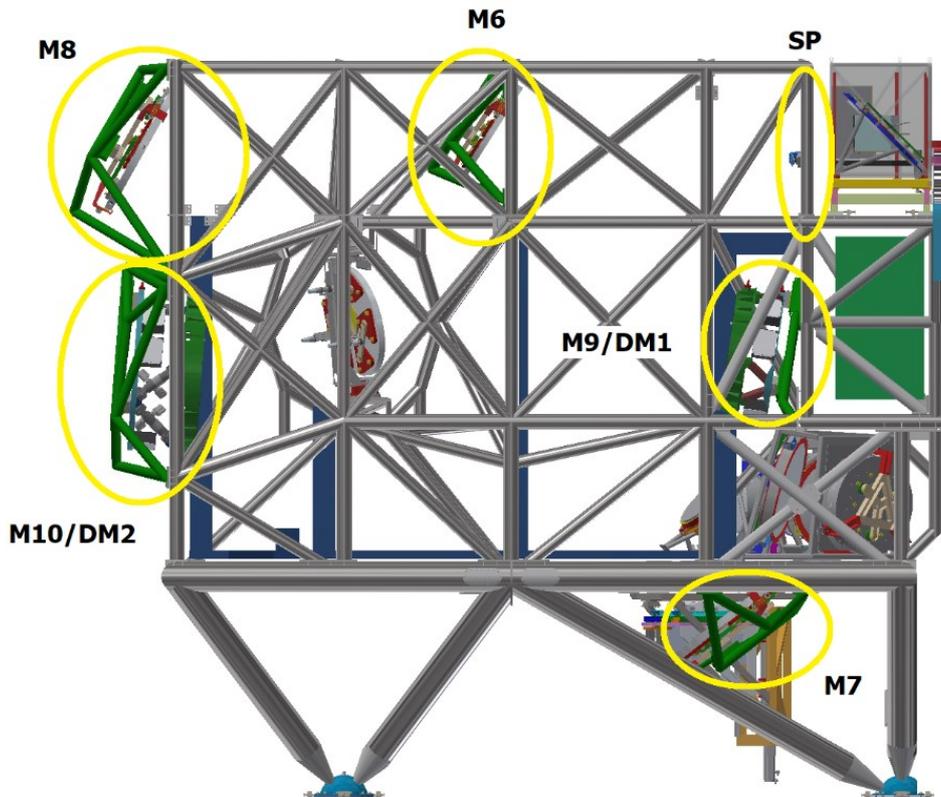


Figura 79. MORFEO MSS con le OSS installate

Sono presenti, inoltre, altre strutture di supporto dette “**holding Structure**” per gli elementi optomeccanici, fornite da PF0 il WP che si occupa delle Optomech, evidenziate con dei cerchi verdi nella figura seguente. Queste *holding Structure* installate sull'MSS sono: **DC+FM1** (Dichroic + Folding Mirror 1), **LGSO** (LGS Objective), **FM3** (Folding Mirror 3).

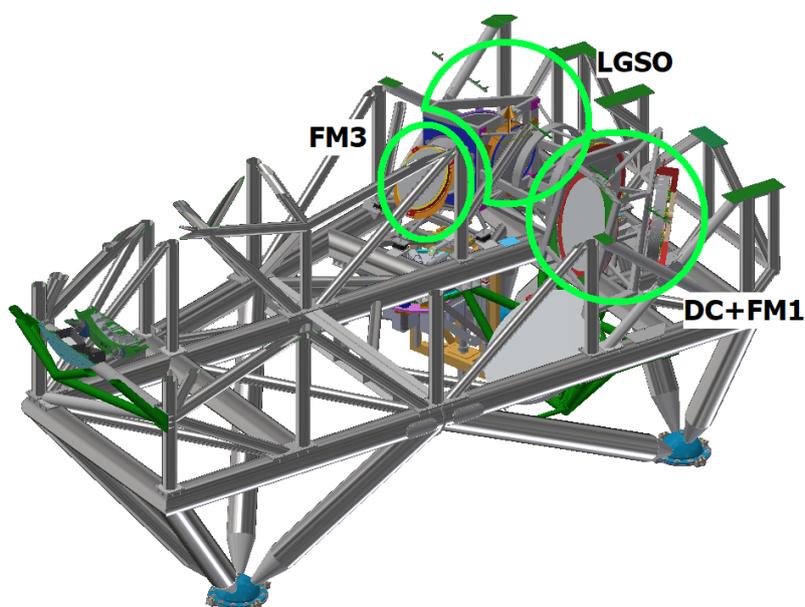


Figura 80. MORFEO MSS con altre holding Structure per Optomech

Sulla MSS oltre agli elementi optomeccanici sono installati anche: l'**LGS-WFS** (Laser Guide Star - Wave Front Sensor), **CU_MORFEO** (l'unità di calibrazione di MORFEO), un **Cover termico** per l'isolamento passivo, il cablaggio elettronico e i tubi di raffreddamento per il Glicole.

La MSS ospita anche il sub-assy **CU Selector**, sviluppato da PM0 e riportato in Figura 81.

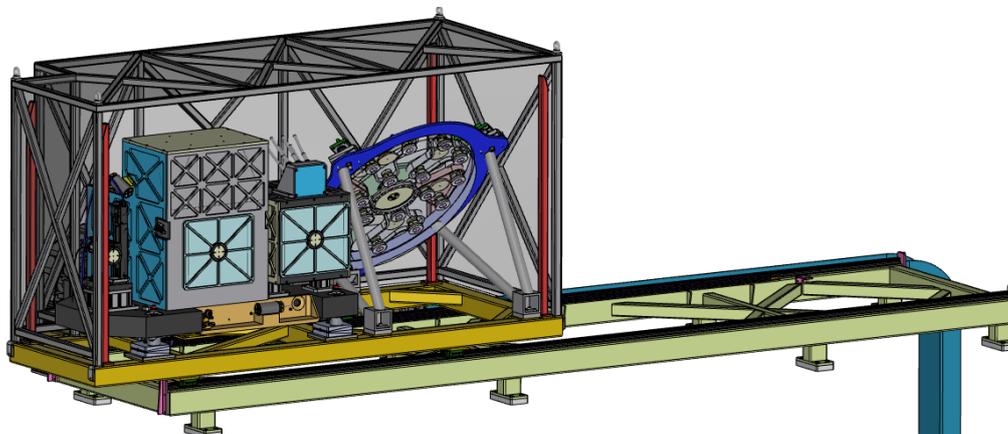


Figura 81. MORFEO CU Selector

La struttura di supporto principale di MORFEO, la **MSS**, è composta da **più parti separate**, sia per ragioni di trasporto che per ragioni di AIV (Assembly Integration and Verification) dello strumento. Le varie parti, unite tra loro tramite flange di collegamento, sono:

- **7 parti principali**, da “A1” a “A7”, rappresentati in grigio nella figura seguente.
- **3 tubi di connessione**, da “A8” a “A10”, rappresentati in blu in figura.
- **13 elementi smontabili**, da “A11” to “A23”, rappresentati in giallo in figura.
- **5 OSS**, le Optomech Support Structure discusse prima, in arancione.

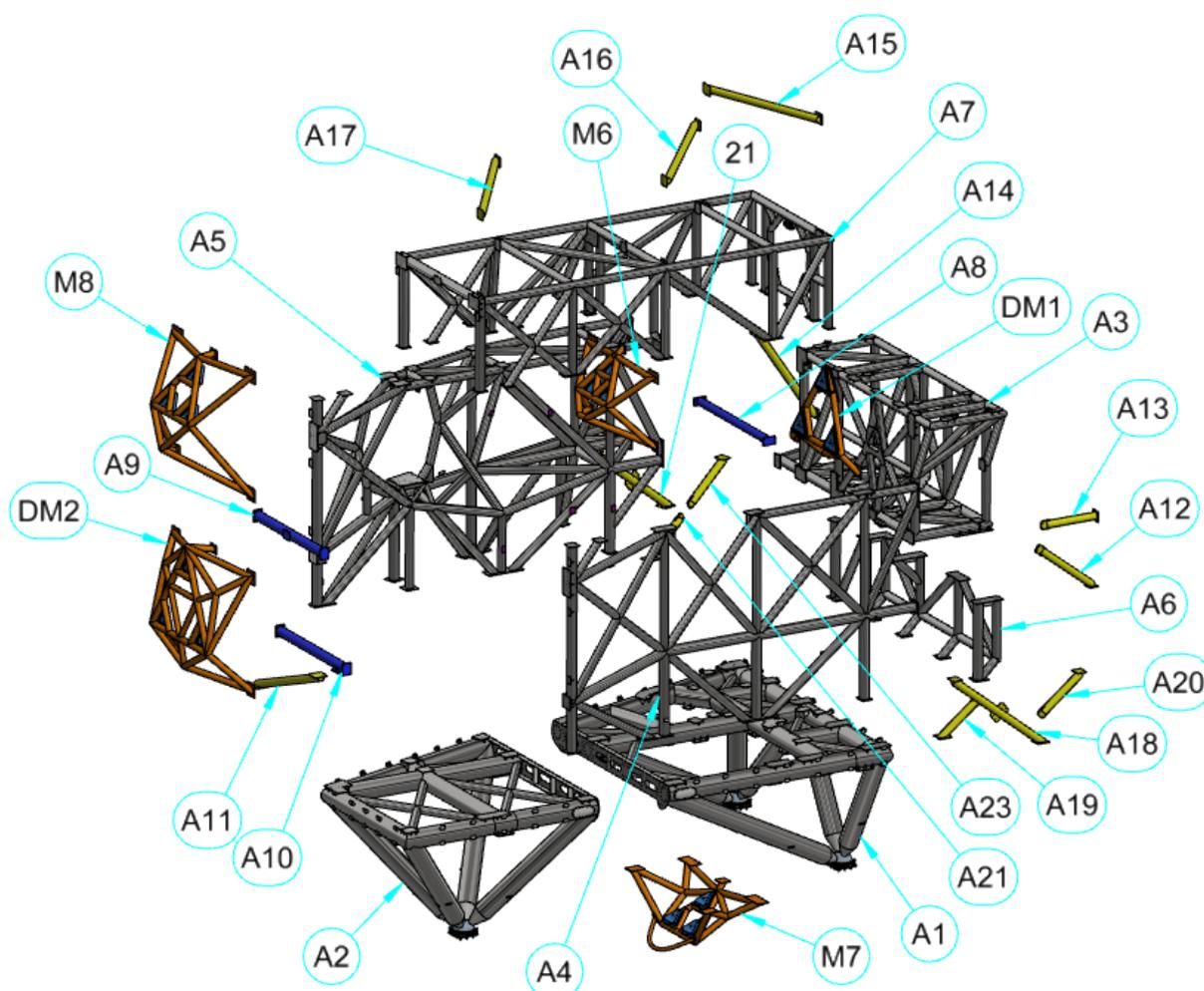


Figura 82. MORFEO MSS Vista esplosa con particolari

Ad avvolgere la MSS troviamo anche un **Thermal Enclosure**, un isolamento passivo, utile a stabilizzare la temperatura interna dello strumento, con uno spessore di circa 72 mm. Avvolge completamente tutta la MSS con pannelli sia fissi che removibili per favorire l’accessibilità.

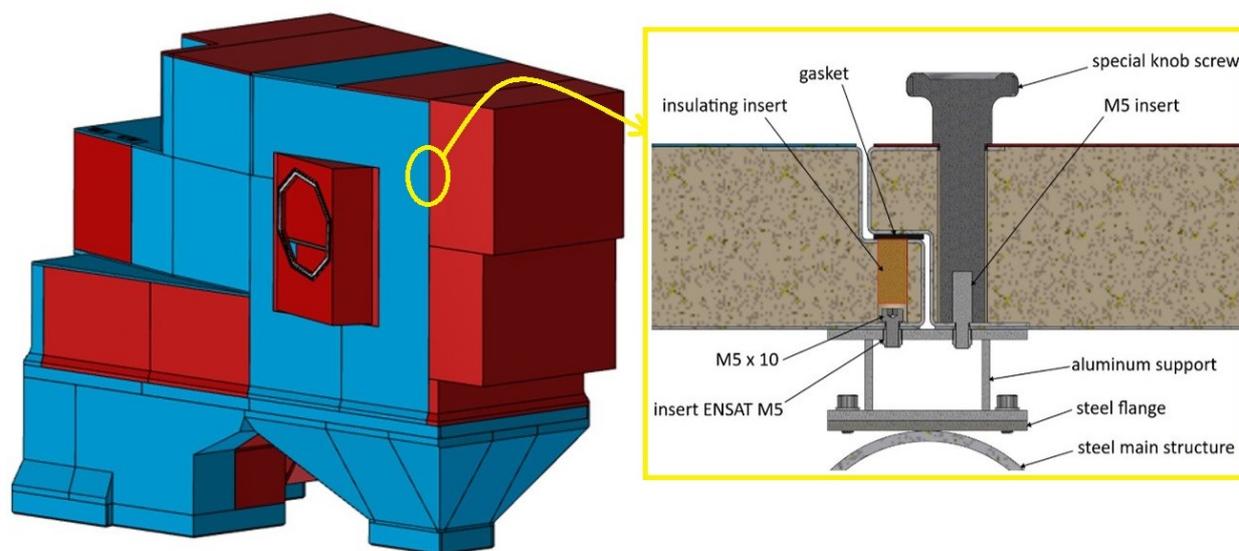


Figura 83. MORFEO Enclosure e sistema di fissaggio dei pannelli

Le dimensioni complessive di ingombro della **Main Support Structure** di MORFEO risultanti dal design ed estrapolate direttamente dal software CAD Inventor sono: **7853 x 4771 x 6679 mm** senza considerare il suo **Thermal Enclosure**.

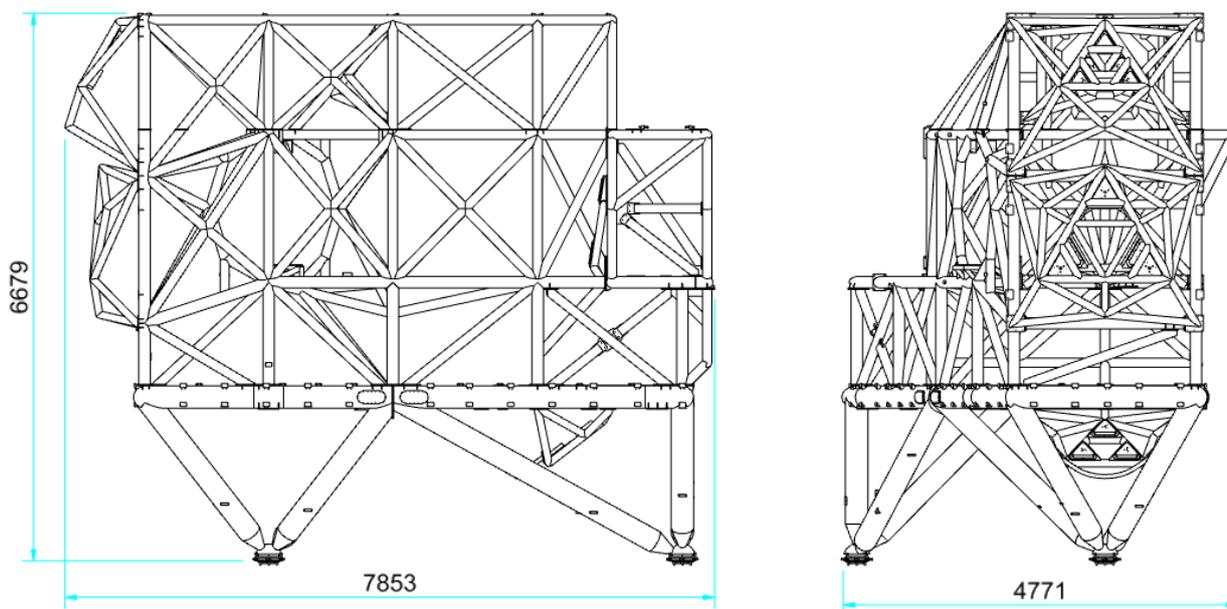


Figura 84. MORFEO MSS dimensioni di ingombro

Questo progetto meccanico definitivo per la **PDR** dell'MSS di MORFEO è stato finalizzato nel maggio del 2021 (2Q21) sotto guida PM0 e sottoposto ad ESO per la review formale.

5.2 MORFEO MSS: il modello per la FEA

Tutte le analisi strutturali riportate in questa tesi riguardano solo l'ultimo design della MSS di MORFEO che si adatta perfettamente al percorso ottico MAORY Mirror System mostrato precedentemente in Figura 74. L'insieme delle parti che compone l'MSS segue una stessa filosofia progettuale: l'assy è una struttura reticolare a traliccio, modellata intorno al disegno ottico, in modo da ottimizzare la massa globale della struttura e massimizzare la sua rigidità.

Proprio per massimizzare questo rapporto tra rigidità globale e massa complessiva della MSS, sono stati selezionati dei profili tubolari circolari. Infatti, i profili tubolari circolari ottimizzano l'inerzia e riducono al minimo la massa rispetto ad altri tipi di profili tubolari comuni. Poiché l'MSS è una struttura portante con una massa complessiva abbastanza importante, è stato verificato che utilizzando profili tubolari differenti (ad esempio quadrati o rettangolari) l'aumento di massa totale del sistema risulta significativo. Seguendo la stessa filosofia di ottimizzazione ed anche per armonizzare la massa globale del sistema, si è deciso di utilizzare un buon numero di profili diversi per la progettazione della MSS. L'intero assy, comunque, è realizzato con profili standard in **Structural Steel** (paragrafo 4.4.2 per le caratteristiche dei materiali comuni usati nei FEM Ansys). Il corpo centrale della MSS poggia su un numero di gambe pari a 10, mentre i punti di vincolo sulla Piattaforma Nasmyth sono solo 3 (rispettivamente nei punti di interfaccia 1 e 2 convogliano 3 gambe per punto e nel punto 3 ben 4).

Il modello FE sviluppato sul disegno CAD precedentemente descritto è denominato **FEM_MSS_Type_6** ed è stato realizzato per eseguire tutte le analisi strutturali necessarie a verificare la compliance strutturale della MSS e del suo payload. Il modello CAD utilizzato per la FEA, raffigurato in Figura 85 sulla destra, rappresenta una semplificazione concettuale del CAD 3D completo della MSS (riportato alla sua sinistra). Tutto ciò è in linea con quanto dichiarato in

apertura del paragrafo 4.4 ricalcando quello che è lo standard procedurale per le FEA di strutture a traliccio in acciaio.

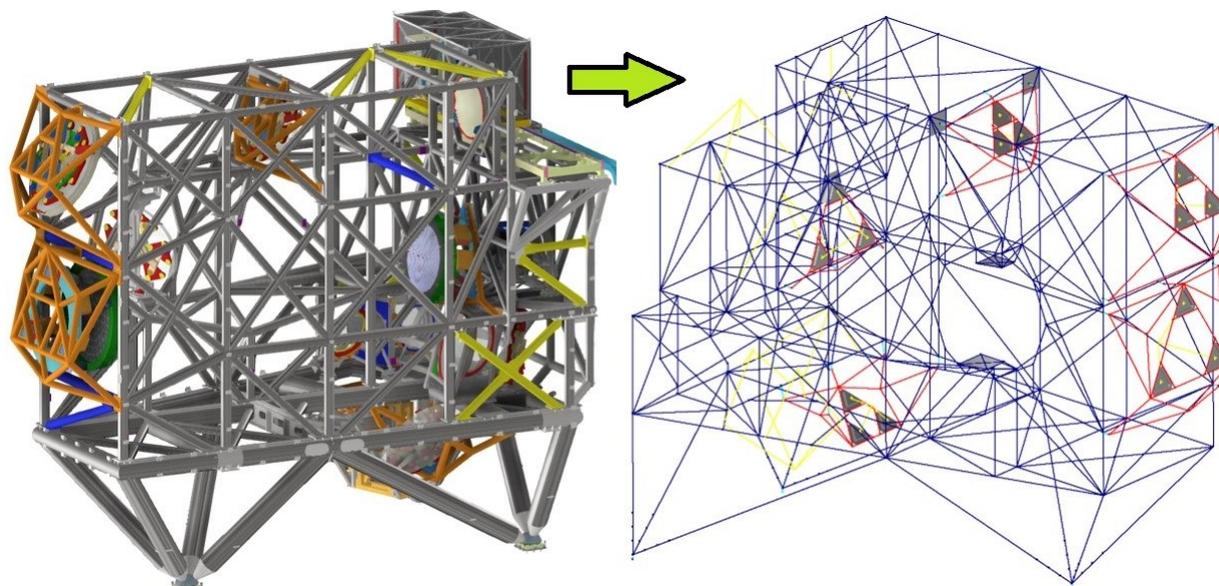


Figura 85. MORFEO MSS: 3D CAD (sinistra) e CAD per FEA (destra)

Per avere un modello FEM più leggero e tempi di calcolo più brevi, è stato idealizzato un modello CAD per la FEA molto più semplice rispetto al CAD 3D completo della MSS (come mostrato nella figura precedente). Questo processo di semplificazione geometrico è un approccio standard nell'analisi FE può fornire risultati accurati a livello globale, se usato opportunamente. Ad ogni modo, per le analisi di dettaglio che possano indagare il comportamento locale del sistema, vista la complessità della geometria in studio, sono state effettuate anche alcune analisi di sotto modellazione 3-D (vedi capitolo 6 sul Submodeling FEA). In questo modo, si possono avere oggetti FE virtuali con un comportamento paragonabile ai tralicci, giunti e pannelli 3D, utilizzando, un modello molto leggero e flessibile con cui eseguire calcoli e prove preliminari.

Oltre al modello 3D, precedentemente descritto, anche il modello CAD per FEA è composto da più parti collegate mediante elementi rigidi 1-D (MPC184), precedentemente descritti (paragrafo 4.4.1). Come si può evincere dalla Figura 85, per sviluppare il modello CAD per la FEA della MSS di MORFEO, sono stati utilizzati elementi trave 1-D (BEAM 188), elementi piani 2-D

(SHELL 181) ed elementi massa (MASS21). Per maggiori informazioni in merito a questi elementi si rimanda al paragrafo 4.4.1.

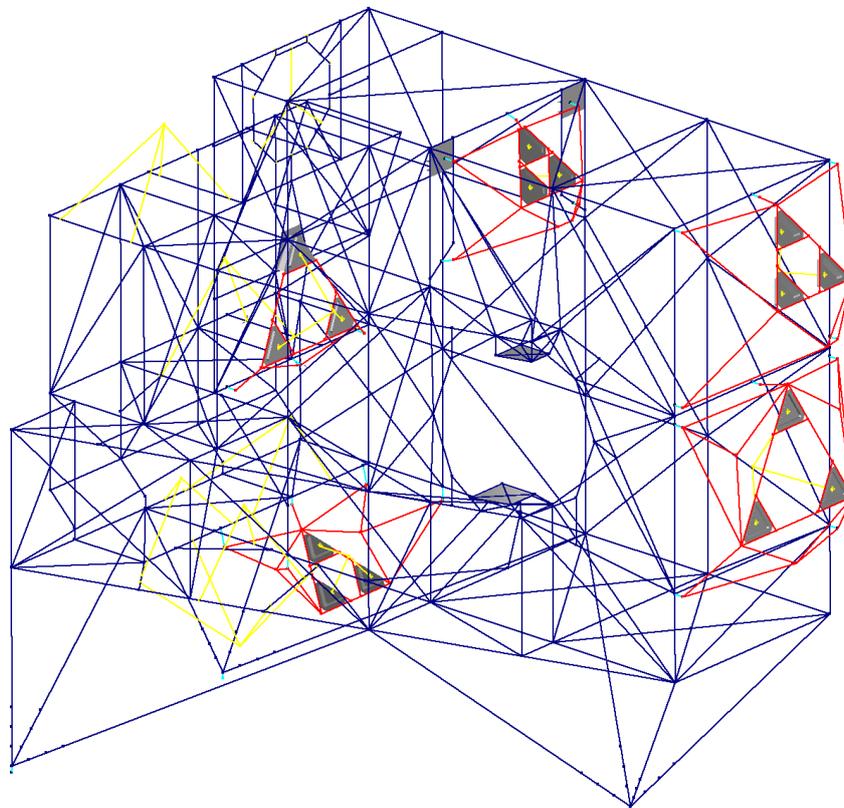


Figura 86. MORFEO MSS CAD per FEA

Gli elementi FE utilizzati sono rappresentati con colori diversi nel CAD per FEA di Figura 86:

- Gli elementi lineari in blu vengono utilizzati per i profili della MSS,
- Gli elementi lineari in rosso sono usati per i profili delle OSS,
- Gli elementi di superficie in grigio chiaro sono utilizzati nelle OSS e per supportare M11,
- Gli elementi lineari in azzurro chiaro sono usati per collegare le diverse parti della MSS,
- Gli elementi lineari in giallo vengono utilizzati per trasferire il carico dai punti massa ai nodi collegati alla MSS o alle OSS,
- Gli elementi di massa, non evidenziati, vengono utilizzati per simulare la massa nel CoG degli elementi ottici. In effetti, rappresentano essenzialmente il vertice degli elementi di linea gialla precedentemente illustrati.

L'ultimo modello FE progettato per la MORFEO MSS, chiamato **MSS_Type_6**, è molto diverso rispetto al modello di partenza sviluppato a febbraio 2020 (**MSS_Type_2.3**, vedi Figura 87 sotto). In questo nuovo concept sono stati spostati gli elementi rigidi dai nodi master della MSS alle piastre di interfaccia sui supporti meccanici delle OSS, introducendo queste ultime come parte integrante del layout meccanico della MORFEO MSS (si veda Figura 87).

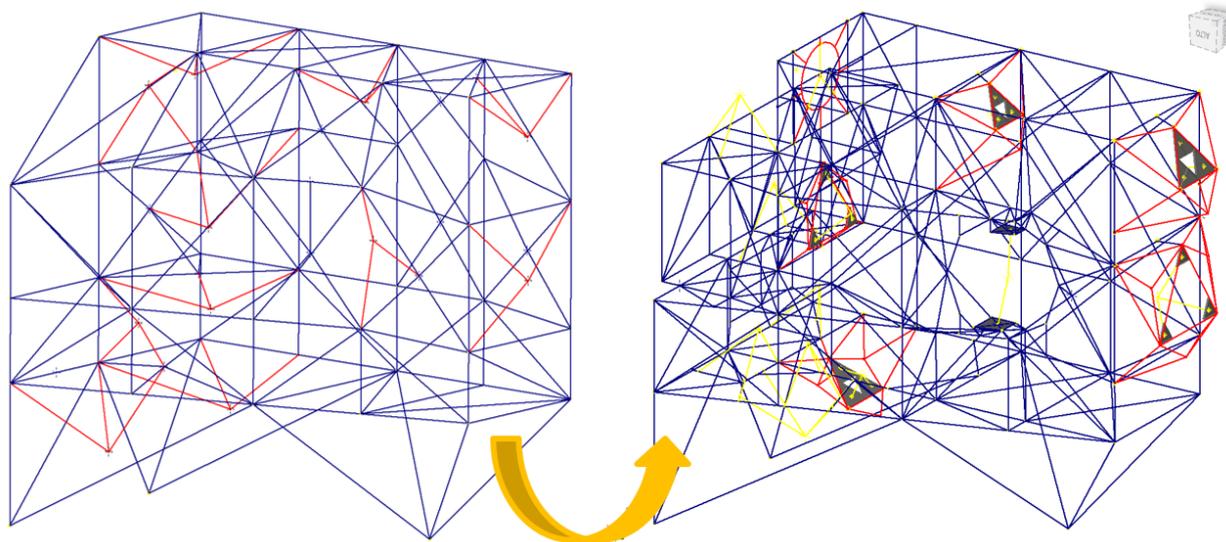


Figura 87. Confronto tra **MSS_Type_2.3** (sinistra) e **MSS_Type_6** (destra)

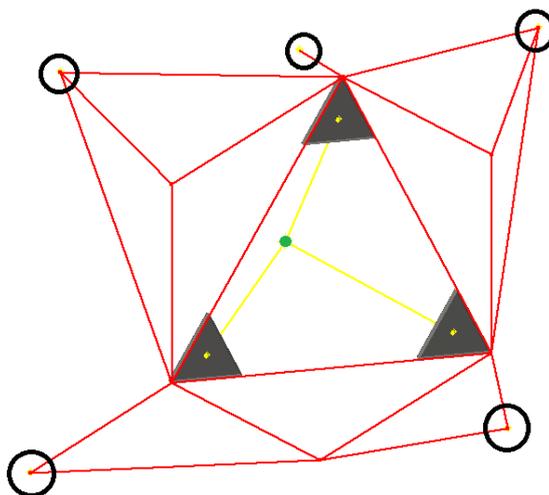


Figure 88. Esempio di CAD per FEA di una OSS con i suoi elementi rigidi (in giallo)

Sono state infatti rimosse le masse concentrate, precedentemente collegate con elementi rigidi direttamente sui nodi della struttura, per realizzare delle vere e proprie “strutture tubolari in acciaio” in cui sono installati gli specchi con i relativi supporti, le **OSS**. Quindi, nelle analisi in

corso abbiamo utilizzato questo disegno della struttura di supporto principale al fine di ottimizzare la risposta della struttura stessa e non sovrastimarne la rigidità. È stato confermato con diversi set di analisi FEA che questo approccio è molto più accurato del precedente e non aumenta in modo significativo l'onere computazionale di calcolo del modello.

D'altra parte, nonostante il miglioramento ottenuto con questi aggiornamenti al modello FE, si è preferito, per garantire una migliore aderenza tra modello CAD 3D e modello FE, aggiungere delle masse concentrate o distribuite lungo la struttura della MSS, secondo la procedura definita da ESO, per simulare le differenze locali in termini di massa o, ad esempio, per aggiungere il materiale di saldatura.

5.2.1 Caratteristiche geometriche del modello FE

Le dimensioni complessive del **MORFEO_MSS_Type_6** risultanti dal design CAD sono:

Altezza della struttura di supporto (Z)	~ 6800 mm
Larghezza della struttura di supporto (X)	~ 8200 mm
Lunghezza della struttura di supporto (Y)	~ 4700 mm

La massa simulata derivata dal modello FE viene calcolata assegnando le sezioni geometriche di inerzia alle linee 1D e lo spessore adeguato alle superfici 2D. Le sezioni trasversali di inerzia utilizzate per questa struttura sono tubi circolari standard, ad eccezione della trave ad H centrale e di alcuni piccoli profili sia sopra che sotto M11, che sono di forma quadrata. Per l'attuale configurazione della MSS di MORFEO la massa FE simulata è di **8050 kg** (senza contingenza), compreso il contributo delle masse concertate distribuite lungo la struttura. La massa calcolata dal software FE è stata confrontata con quella derivante dal software CAD, circa **8000 Kg**, ottenendo uno scarto percentuale inferiore all'1% (ampiamente nell'ordine di accettabilità << 3%).

Le coordinate del CoG (Center of Gravity) dell'intero modello FE simulato, con tutto il payload installato, nel sistema di riferimento globale C-SYS MORFEO (vedi paragrafo 4.3.3), sono:

$$\text{MSS CoG } (x, y, z) = -2249,3 \quad 545,9 \quad -2531,4$$

Di seguito sono riportate le caratteristiche delle sezioni di inerzia ed i dettagli geometrici di ciascun profilo impiegato nella costruzione del modello FE della MSS (da Figura 89 a Figura 100).

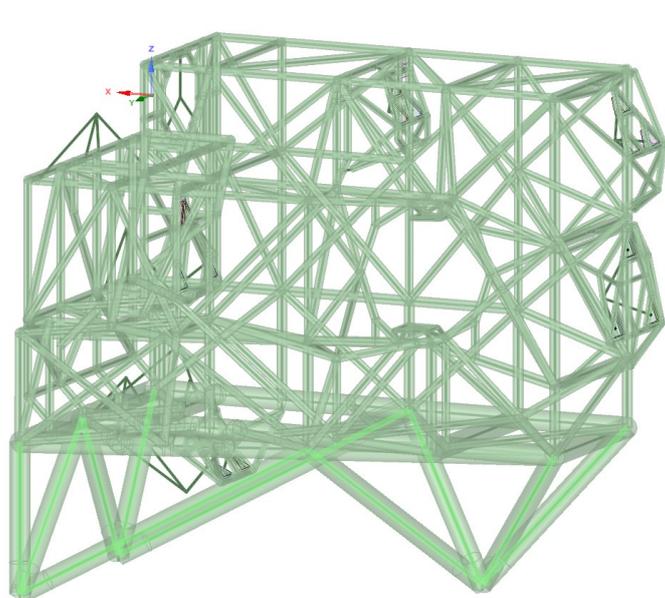


Figure 89. Dettaglio Geometria: profilo 1

Profilo 1

Profilo Gambe

Tubolare circolare cavo

Φ 273 mm – th. 6.3 mm

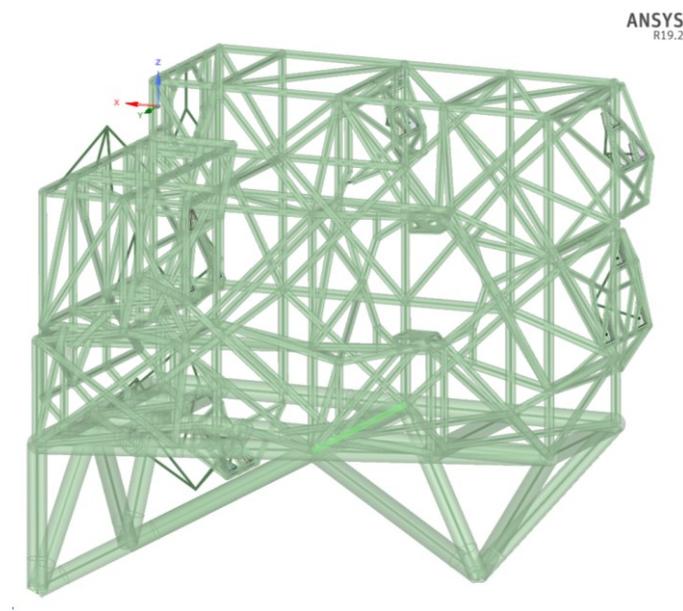


Figure 90. Dettaglio Geometria: profilo 2

Profilo 2

Trave centrale

H-beam customizzata

W1 180 mm

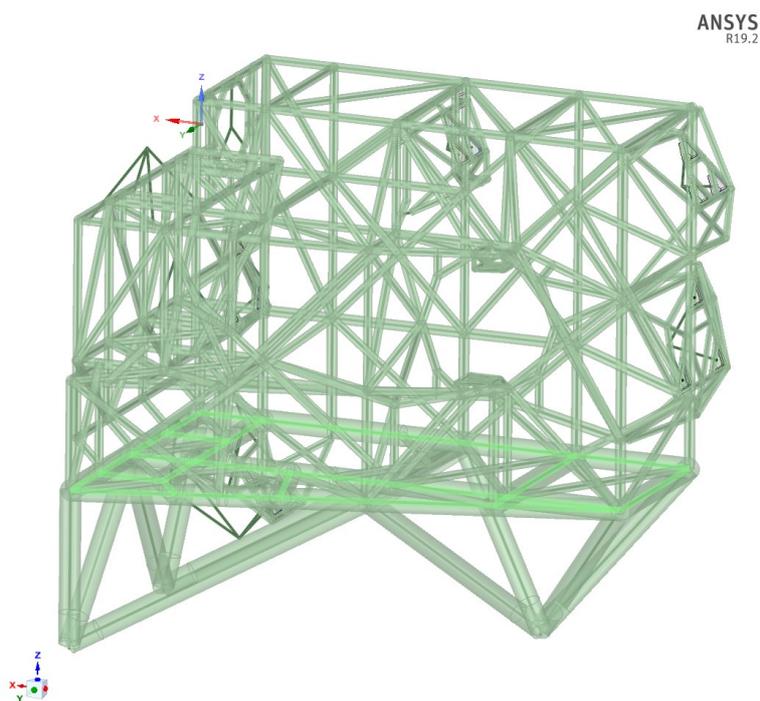
W2 180 mm

W3 292 mm

t1 8 mm

t2 8 mm

t3 16 mm



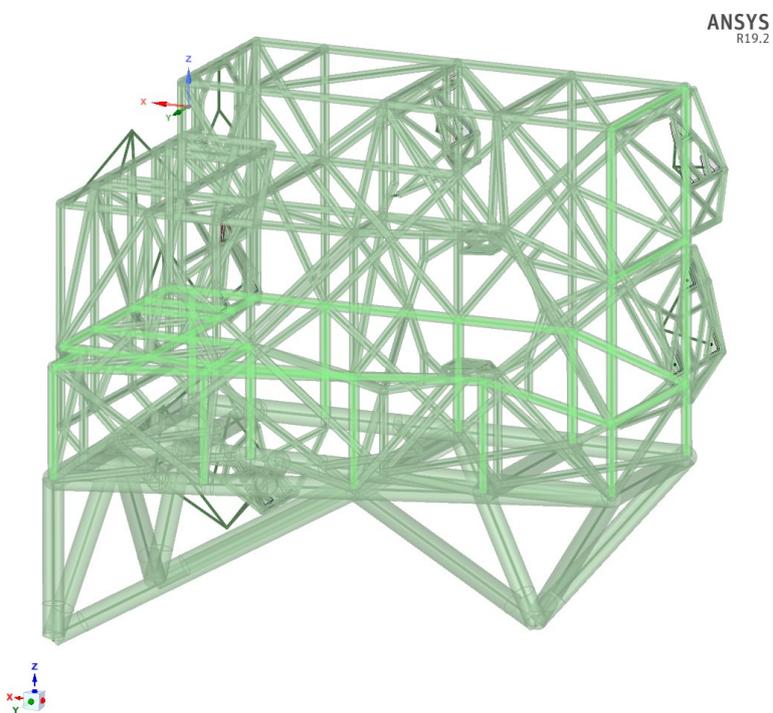
Profilo 3

Profilo 1° livello

Tubolare circolare cavo

Φ 273 mm – th. 5 mm

Figure 91. Dettaglio Geometria: profilo 3



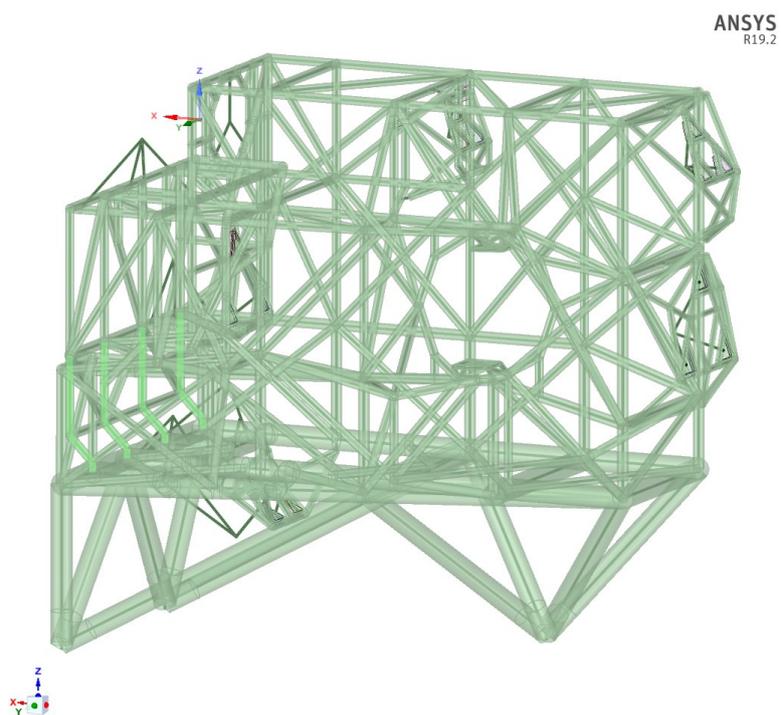
Profilo 4

Profilo 2° livello

Tubolare circolare cavo

Φ 139.7 mm – th. 5 mm

Figure 92. Dettaglio Geometria: profilo 4



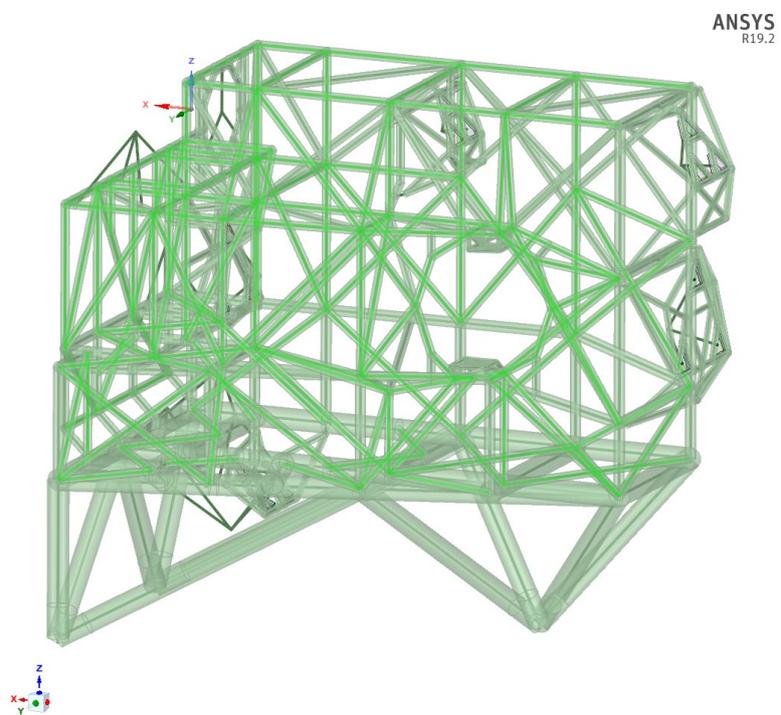
Profilo 5

Profilo verticale lato PFS

Tubolare circolare cavo

Φ 114.3 mm – th. 5 mm

Figure 93. Dettaglio Geometria: profilo 5



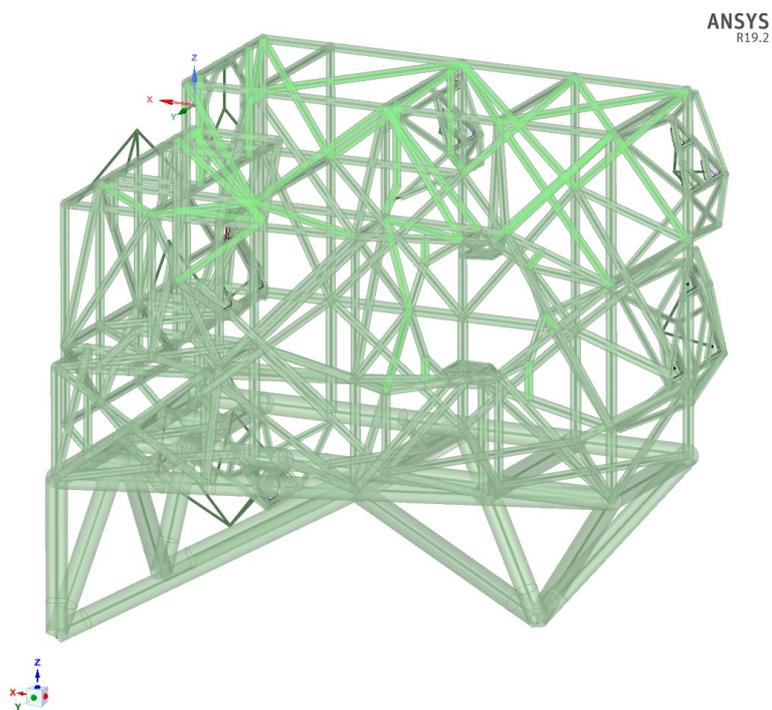
Profilo 6

Profilo 3° livello

Tubolare circolare cavo

Φ 114.3 mm – th. 4 mm

Figure 94. Dettaglio Geometria: profilo 6



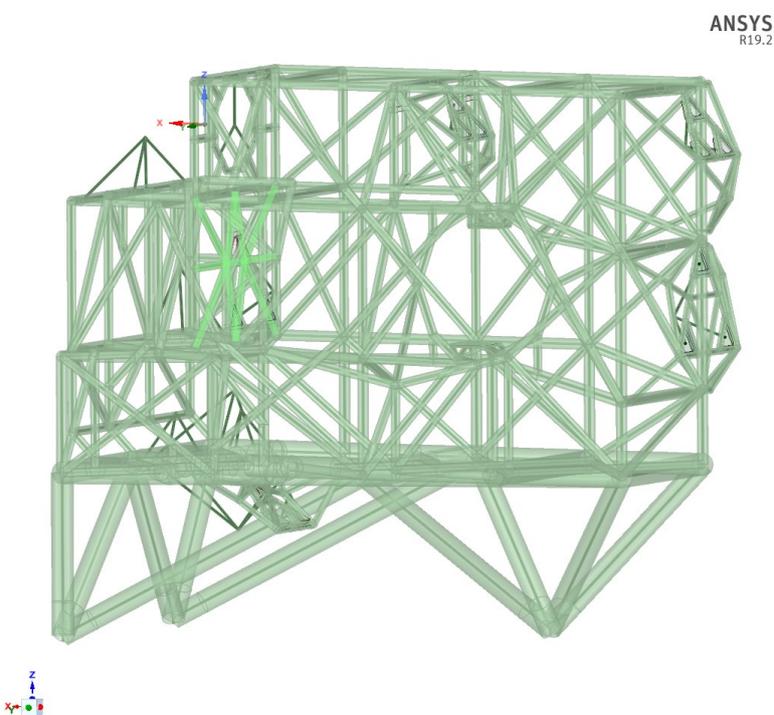
Profilo 7

Profilo diagonale 3° livello

Tubolare circolare cavo

Φ 108 mm – th. 2.9 mm

Figure 95. Dettaglio Geometria: profilo 7



Profilo 8

Profilo di rinforzo

attorno DM1

Tubolare circolare cavo

Φ 101.6 mm – th. 4 mm

Figure 96. Dettaglio Geometria: profilo 8

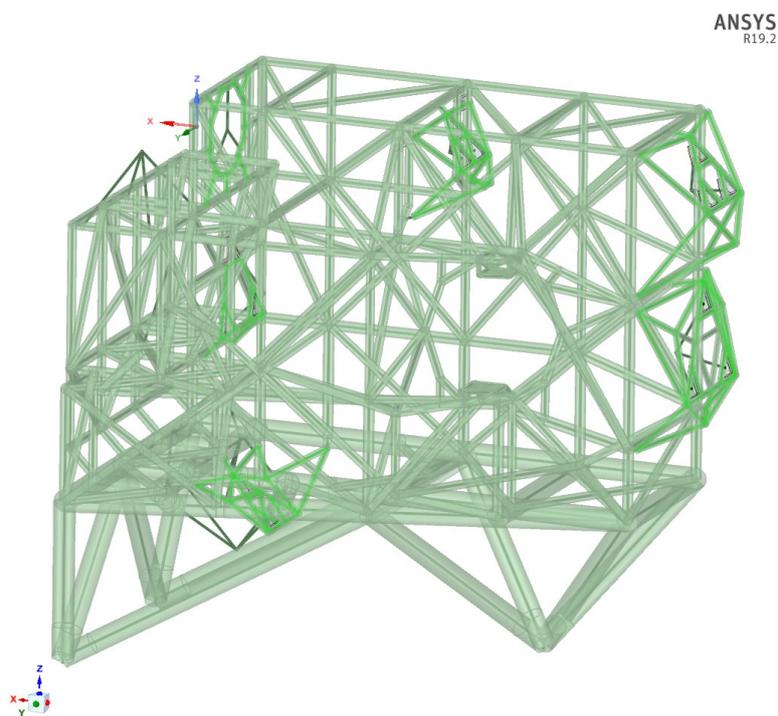


Figure 97. Dettaglio Geometria: profilo 9

Profilo 9

Profilo Optomechs

Tubolare circolare cavo

Φ 88.9 mm – th. 2.9 mm

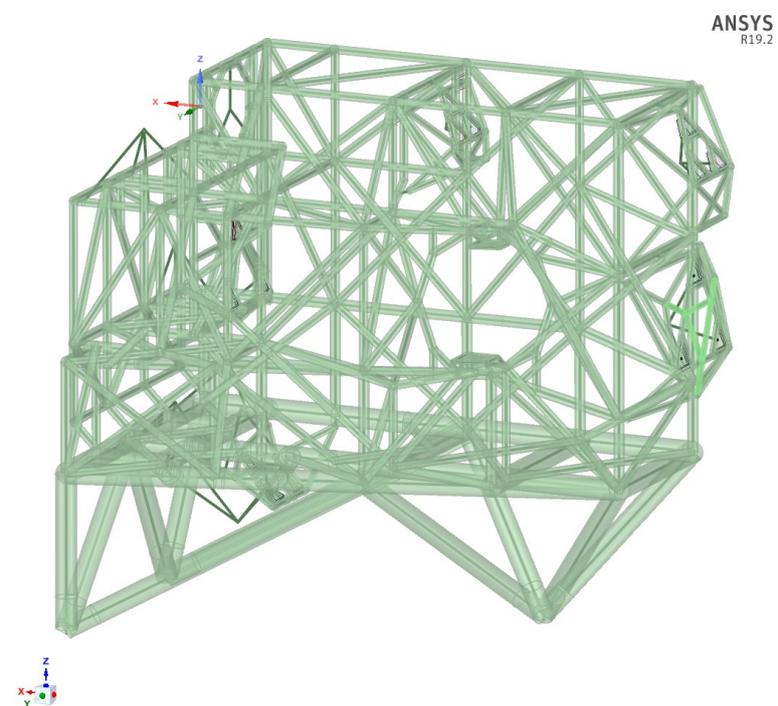


Figure 98. Dettaglio Geometria: profilo 10

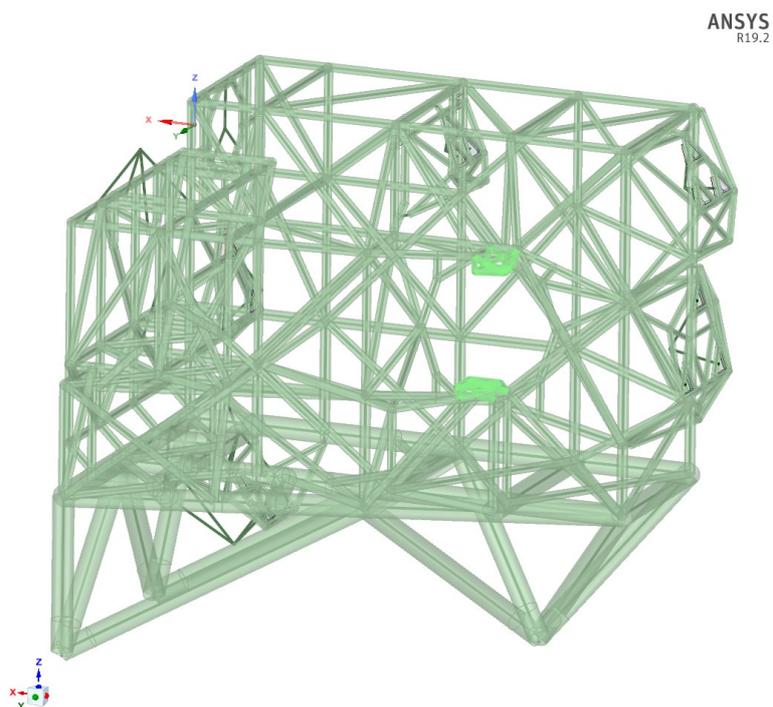
Profilo 10

Profilo di rinforzo

Optomechanics DM2

Tubolare circolare cavo

Φ 76.1 mm – th. 3.2 mm



Profilo 11

Profilo Supporto_M11

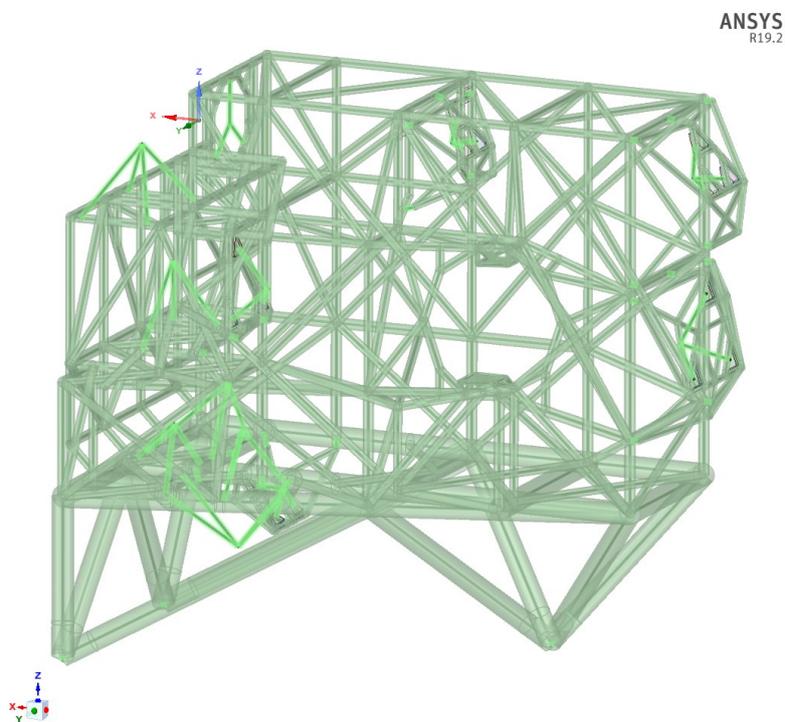
Tubolare quadrato

L1 50 mm

L2 50 mm

t 3.2 mm

Figure 99. Dettaglio Geometria: profilo 11



Profilo 12

Profilo fittizio

Tubolare circolare

Φ 1 mm

Figure 100. Dettaglio Geometria: profilo 12

In questo modello FE sono stati utilizzati diversi elementi piastra sia per le OSS e che per le piastre di supporto di M11, saldate direttamente sulla MSS. Gli spessori di queste piastre dipendono generalmente dai feedback ricevuti dalle analisi FE. In particolare, nel layout di PDR, abbiamo:

- Piastre di interfaccia per Optomech (zona di collegamento con r.e.) → sp. **8 mm**
- Piastre a taglio per Optomech (perpendicolari alle piastre di interfaccia) → sp. **6 mm**
- Superficie inferiore di spessore blu per optomeccanica (parallela alle piastre di interfaccia, comprensive sia della piastra blu, sia della piastra grigia saldata sul telaio OSS) → sp. **12 mm**
- Piastre di interfaccia superiori per DM2 (zona di collegamento con r.e.) → sp. **14 mm**
- Piastre di interfaccia inferiori per DM2 (zona di collegamento con r.e.) → sp. **12 mm**
- Piastre di interfaccia superiori per DM1 (zona di collegamento con r.e.) → sp. **12 mm**
- Piastre di interfaccia inferiori per DM1 (zona di collegamento con r.e.) → sp. **10 mm**
- Piastra per nervature per DM (perpendicolare alle piastre di interfaccia) → sp. **6 mm**
- Superficie inferiore di spessore blu per DM (parallela alle piastre di interfaccia, comprensiva sia della piastra blu, sia della piastra grigia saldata sul telaio dei DM) → sp. **12 mm**
- Piastre di interfaccia superiori per M11 (saldate sulla MSS) → sp. **8 mm**
- Piastre di interfaccia inferiori per M11 (saldate sulla MSS) → sp. **10 mm**

L'immagine è riportata di seguito (Figura 101), solo a solo scopo di esempio, evidenzia le varie tipologie di elementi piastra impiegati. Per maggiori dettagli e per conoscere gli spessori di tutti gli elementi della piastra, fare riferimento ai disegni tecnici, al modello CAD o a quello FEM della MSS di MORFEO.

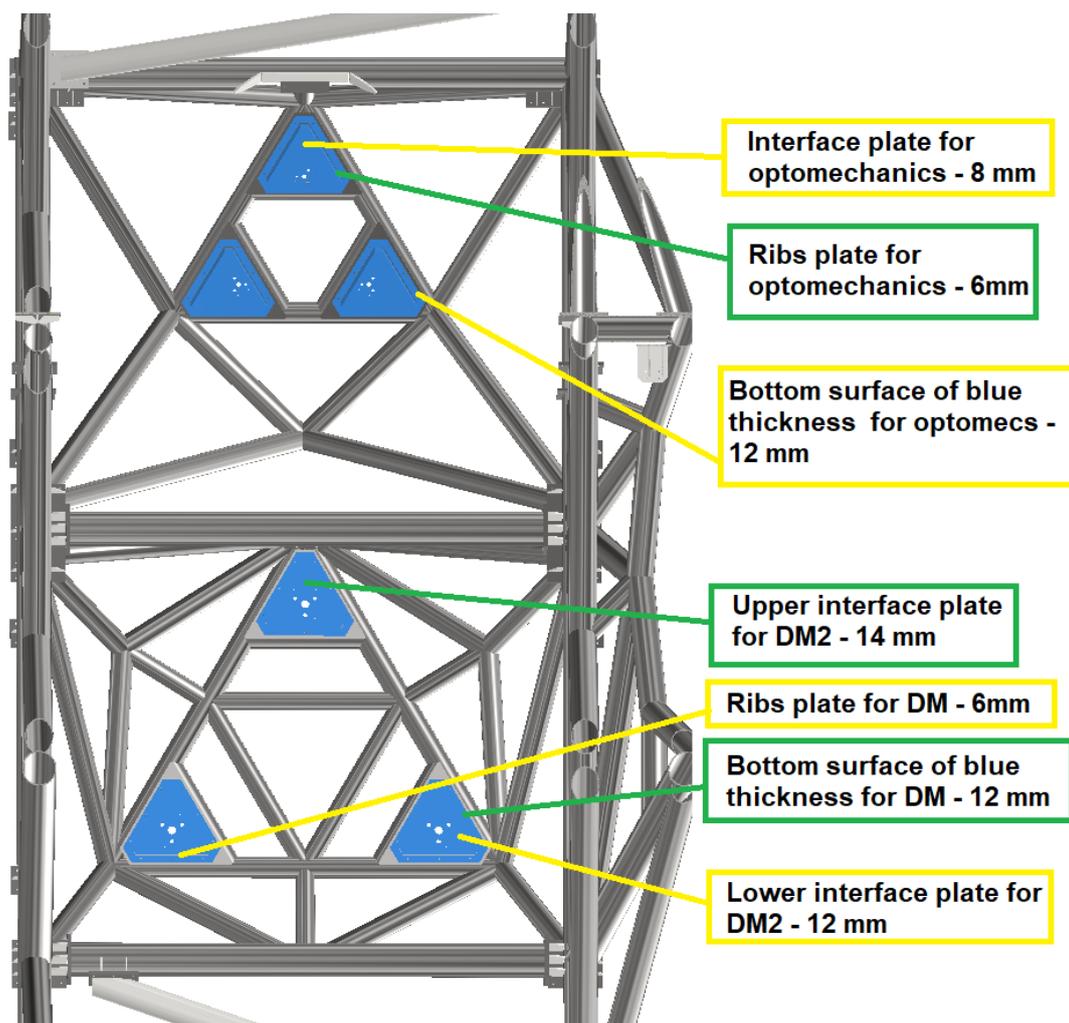


Figure 101. Deettaglio elementi piastra MORFEO MSS_Type_6

5.2.2 Caratteristiche dei materiali utilizzati

Per garantire che la struttura avesse le corrette performance meccaniche sono stati utilizzati diversi materiali. Il materiale di default utilizzato è:

- **ANSYS Structural Steel**, per l'analisi a livello globale della MSS, un materiale di comune utilizzo nell'analisi FE e ben descritto nel paragrafo 4.4.2.

Per rispondere alle esigenze locali sulle piastre di interfaccia con le Optomech e per soddisfare una peculiare esigenza, nei joint sulla piattaforma Nasmyth sono stati utilizzati materiali, via via, più performanti al fine di garantire il giusto margine di sicurezza nella progettazione della struttura.

Qui di seguito sono riportate le proprietà di questi materiali utilizzati.

- **Acciaio WELDOX 700**, per la semisfera delle flange di interfaccia con la NP.

Plate thickness mm	Yield strength ¹⁾ $R_{p0,2}$ min MPa ²⁾	Tensile strength ¹⁾ R_m MPa ²⁾	Elongation ¹⁾ A_5 min %
4,0 - 50,0	700	780-930	14
50,1 - 100,0	650	780-930	14
100,1- 130,0	630	710-900	14

¹⁾ For transverse test pieces
²⁾ 1 MPa = 1 N/mm²

Figura 102. Proprietà meccaniche WELDOX 700

- **Acciaio 40NiCrMo7**, per lo snodo sferico nelle flange di interfaccia con la NP.

Stato Condition	Saggio Ø mm. Specimen Ø mm.	Re min. N/mm ²	Rm N/mm ²	A min. %	KCU min. J
Bonificato	≤ 16	835	1030÷1230	11	30
	≤ 40	785	980÷1180	11	30
Hardened and tempered	≤ 100	735	930÷1130	12	30
	≤ 160	665	850÷1030	13	30
	≤ 250	635	780÷980	13	30

Figura 103. Proprietà meccaniche 40NiCrMo7

- **Acciaio S355JR**, usato anche per parti della MSS o sulle OSS, a seconda dei feedback provenienti dalla FEA. Ad esempio il giunto centrale è realizzato in acciaio S355JR, che è più performante del ANSYS Structural Steel. **355** nel suo nome si riferisce alla tensione di snervamento del materiale espressa in MPa.

QUALITÀ	Yield point								Ultimate tensile strenght			
	Carico unitario di snervamento minimo $R_e H$ N / m m ²								Carico unitario di rottura a trazione R_m N / m m ²			
	thickness (spessore nominale in mm)								(spessore nominale in mm)			
	≤ 16	16÷40	40÷63	63÷80	80÷100	100÷150	150÷200	200÷250	≤ 3	3÷100	100÷150	150÷250
S 275 JR+AR	275	265	255	245	235	225	215	205	430-580	410-560	400-540	380-540
S 355 J2+N	355	345	335	325	315	295	285	275	510-680	470-630	450-630	450-630

Figura 104. Proprietà meccaniche S355JR

5.2.3 Vincoli e carichi del modello FE

La MORFEO MSS è montata direttamente sulla piattaforma Nasmyth A attraverso tre flange di interfaccia definite, da ESO, **MAIN**. Le condizioni al contorno del modello FE della **MSS_Type_6** sono state settate come giunti nodali, denominati in ANSYS “fixed support”, che non consentono e quindi bloccano, tutte le 3 rotazioni ed i 3 spostamenti (punti B, C e D in Figura 105). Questi 3 punti geometrici rappresentano i vincoli FE del modello e sono posizionati 10 mm sotto il pavimento della piattaforma Nasmyth, come prescritto da ESO.

Per valutare la massa dell'intera struttura e dei suoi carichi utili viene applicata una accelerazione di gravità terrestre standard ($9806,6 \text{ mm/s}^2$, lungo $-Z$ nel C-SYS MORFEO), come mostrato nella figura seguente al punto A (freccia gialla rivolta verso il basso).

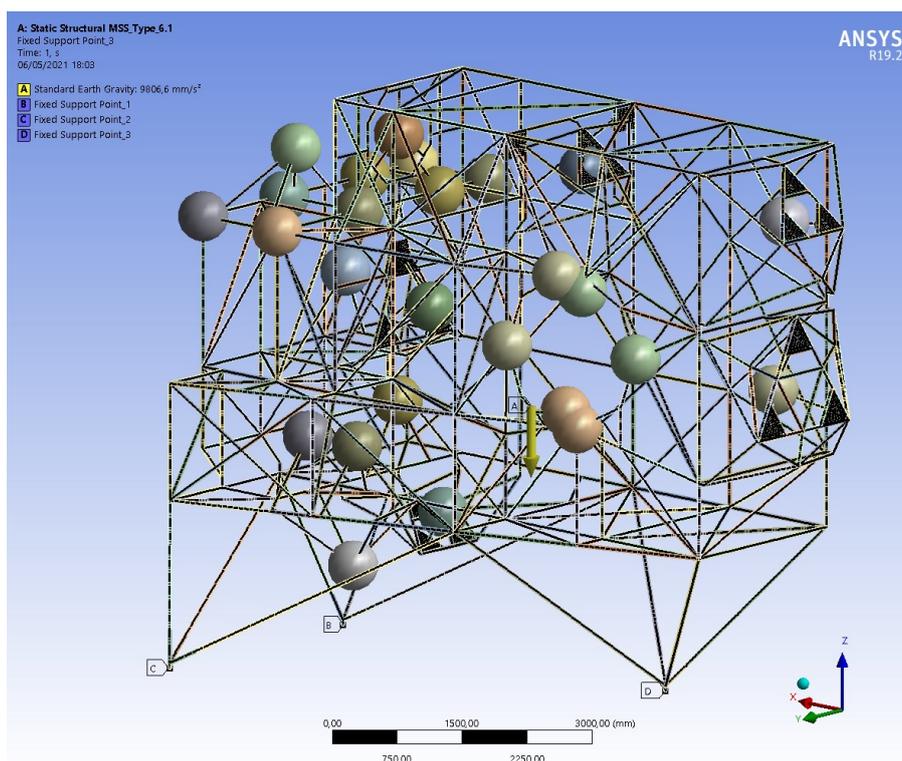


Figura 105. Vincoli e carichi esterni applicati nella FEA

A livello CAD, l'interfaccia meccanica è costituita da elementi di forma sferica, che per la loro geometria, mitigano il trasferimento dei momenti sulla NP. Al fine di simulare adeguatamente il comportamento di questi elementi anche a livello globale, nel modello FEA della MSS, sono stati

implementati tre giunti sferici 1-D, costruendo uno schema statico equivalente paragonabile al caso reale. Come illustrato nella figura seguente (Figura 106), la distanza tra il supporto fisso sulla NP e lo snodo sferico nel modello FE del MORFEO MSS è di **62 mm**. A coprire questa distanza nel modello FE sono state inserite 3 travi, una per ogni punto di interfaccia, simulate come elementi rigidi (in coerenza con l'interfaccia CAD 3D).

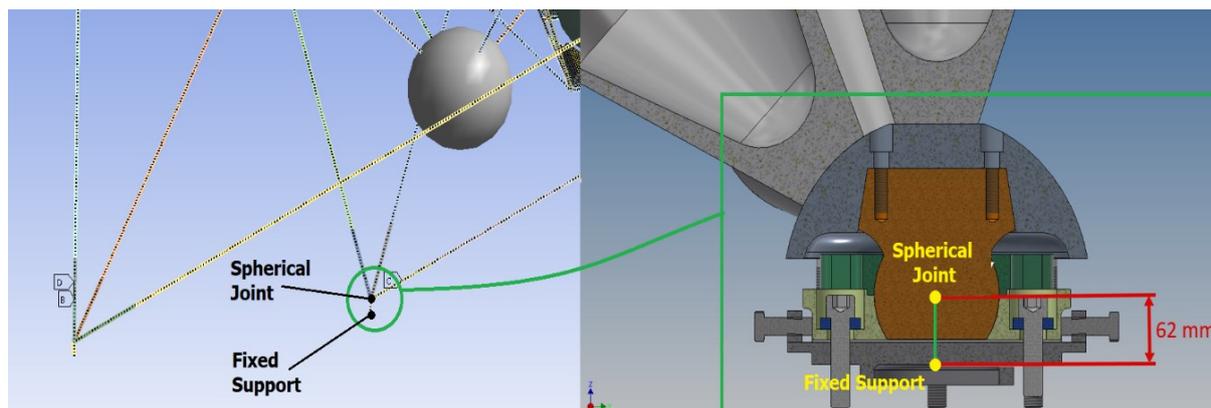


Figura 106. Interfaccia FEM sulla piattaforma Nasmyth

Nella figura sottostante sono rappresentati i tre giunti sferici con i loro sistemi di riferimento locali così come sono configurati nel modello FE della MSS. Gli snodi sferici sono modellati in modo da non consentire traslazioni e lasciare libere le 3 rotazioni attorno agli assi principali.

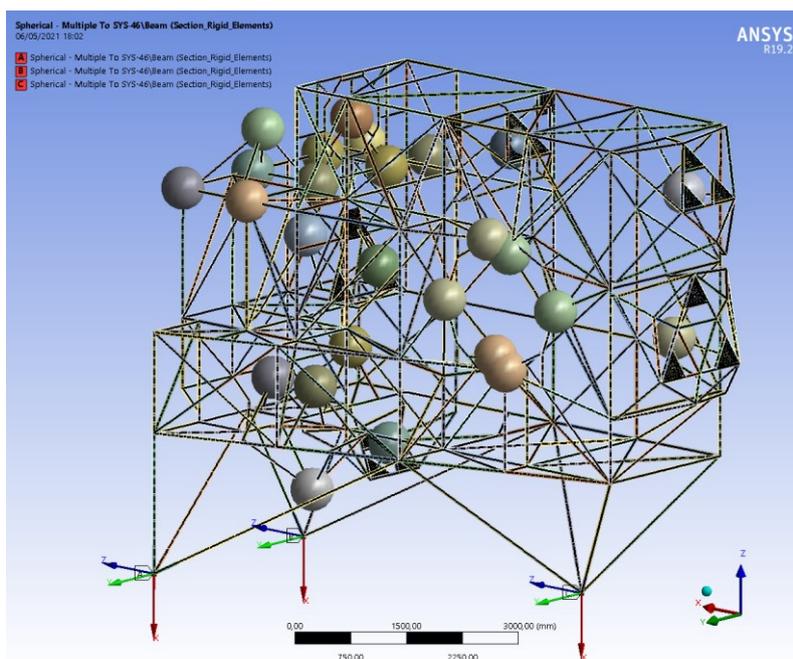


Figura 107. Sistemi di riferimento locale giunti sferici

Nell'immagine successiva viene mostrato tutto il **payload** installato sulla MORFEO MSS.

Sulle piastre di interfaccia optomeccanica delle OSS, come mostrato nella prossima figura, sono presenti i punti di interfaccia tra gli elementi rigidi (collegati direttamente al CoG di ciascuna Optomech) ed i supporti optomeccanici. In questo modello FEM sono stati utilizzati tre punti di interfaccia, per ciascun sottogruppo optomeccanico, tranne che per alcuni item. Solo per l'*LGS-WFS* ed il frame mobile del *CU Selector* sono stati utilizzati 4 punti di interfaccia, rispettando le specifiche tecniche e le interfacce della MSS. Per il dettaglio delle masse di ogni elemento optomeccanico e le relative contingenze applicate si rimanda alla tabella successiva (Figura 109).

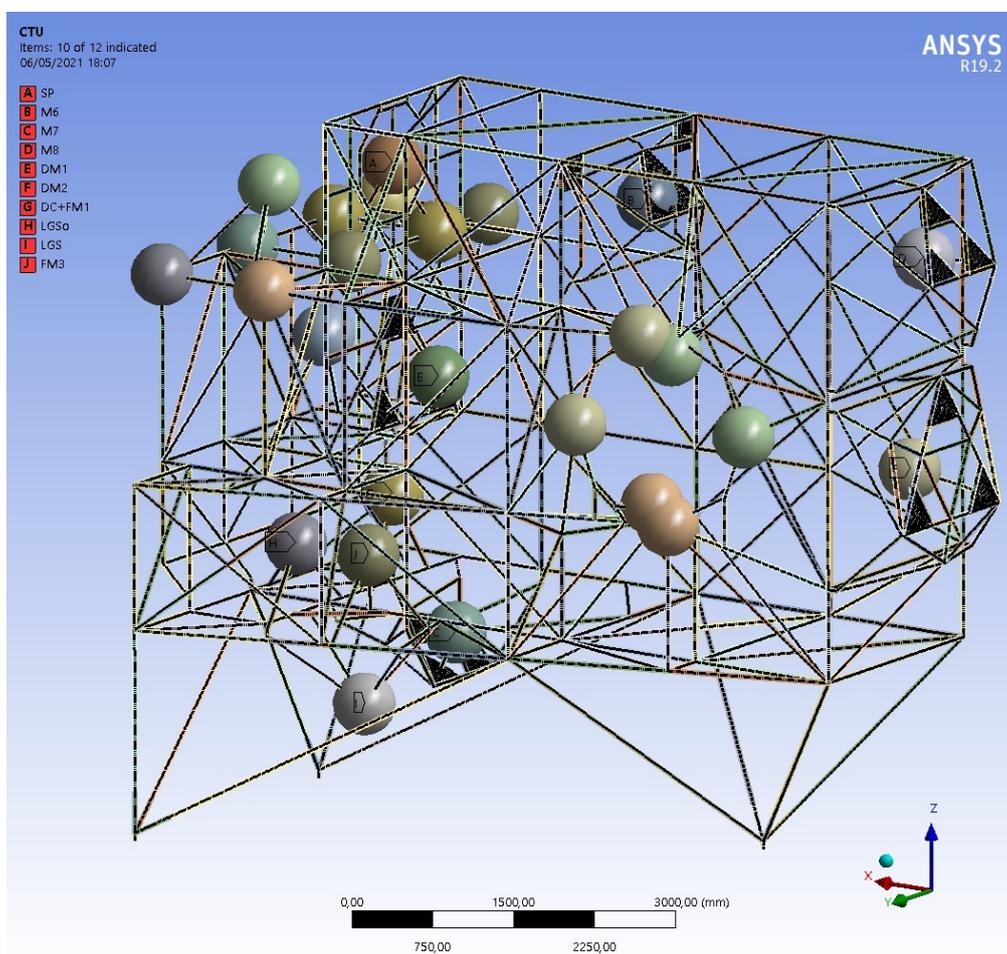


Figura 108. Payload installato sulla MSS

Sommando la massa della **MORFEO MSS** (8050 Kg) e la massa contingentata di tutto il suo **payload** (9049 Kg), la massa globale simulata del modello FE risulta essere: **17099 kg**.

Mass Budget installed on MSS (payloads)			
Element name	Net mass [kg]	Percentage of contingency	Gross mass [kg]
SP	130	20%	156
M6	178	20%	214
M7	305	20%	366
M8	334	20%	401
DM1/M9	586	11%	650
DM2/M10	998	9.5%	1092
M11	291	20%	350
DC	166	20%	715
Holding structure DC+FM1	200	20%	
FM1	230	20%	
LGS0	400	20%	480
FM3	70	20%	84
Linear stage fixed frame	180	10%	200
Linear stage cable chains	100	10%	110
Linear stage mobile frame	142	10%	653
FM CU	213	20%	
MCA	200	20%	
CTU	350	20%	420
LGS	600	20%	720
Enclosure MAORY	1600	20%	1920
Thermal tube MICADO side	40	20%	48
Electrical routing	270	20%	324
Glycol routing	80	20%	96
Thermal ricirculator system	25	100%	50
Total	7688	//	9049

Figura 109. Mass Budget installato sulla MSS

La massa del payload sopra descritto rappresenta il contributo gravitazionale degli elementi optomeccanici, sottosistemi, impianti ecc. installati sulla MSS. Ogni elemento optomeccanico e ogni holding structure che lo ospita, viene simulato come massa concentrata nel suo CoG. La massa totale di ogni montaggio optomeccanico è stata quindi applicata, come peso nodale, nel suo CoG, collegando questo alle piastre di interfaccia sulle OSS tramite elementi rigidi. Questa

impostazione esclude M11, simulato utilizzando due masse concentrate sui punti di attacco dell'interfaccia optomeccanica sulla MSS, per non sovrastimare la rigidità della MSS in quella zona. Gli elementi rigidi legano tutti i gradi di libertà del CoG ai gradi di libertà dei tre i punti posti sulla superficie di interfaccia del supporto optomeccanico. Per simulare su MORFEO il peso del **cover termico**, del **percorso elettrico**, del **percorso del Glicole** e del **sistema di ricircolo dell'aria**, secondo i requisiti e le specifiche tecniche della MSS, la loro massa complessiva (opportunamente contingentata secondo la tabella precedente) è stata applicata come massa distribuita uniformemente sulle travi evidenziate in rosso nelle figure (vedere la Figura 110 e 111).

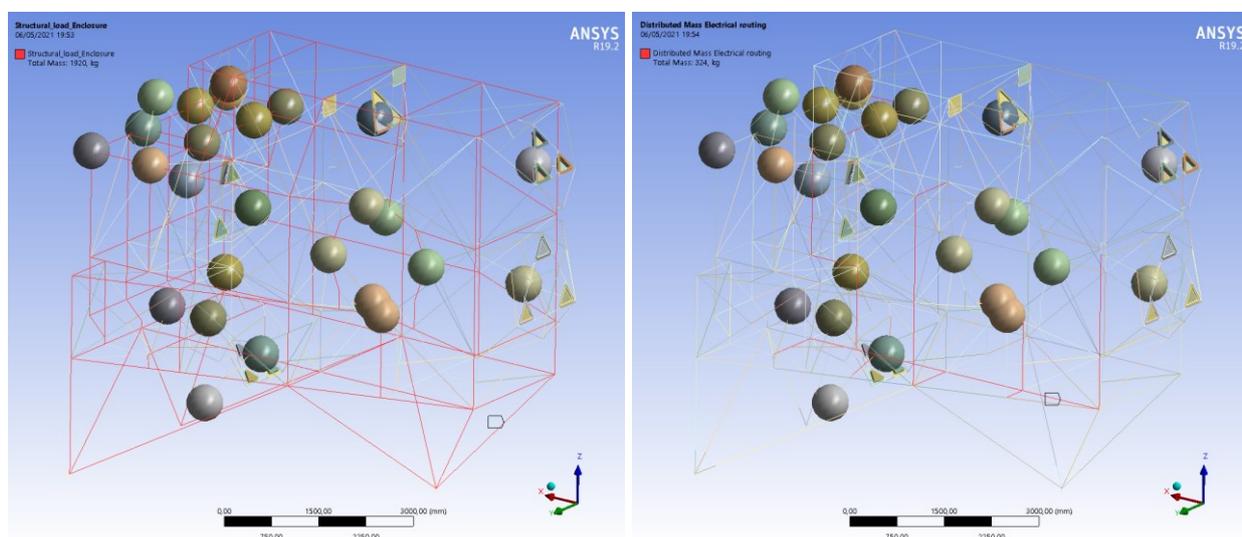


Figura 110. Massa distribuita MSS: cover termico di MORFEO (dx), percorso elettrico (sx)

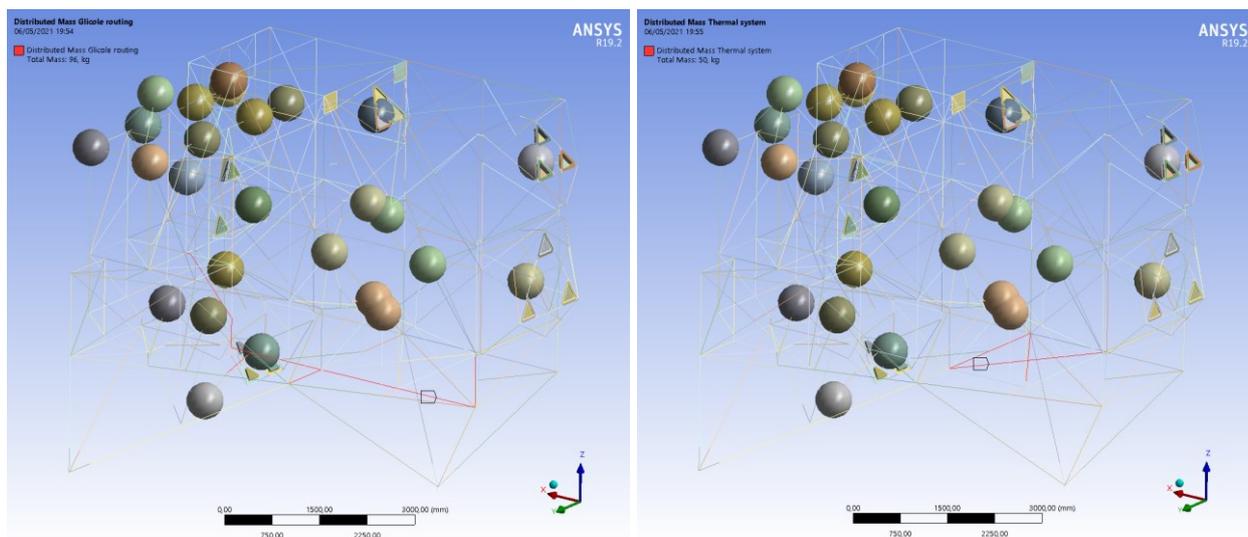


Figura 111. Massa distribuita MSS: percorso Glicole (dx) e sistema di ricircolo dell'aria (sx)

Nell'immagine successiva (Figura 112) sono rappresentate le aliquote di massa distribuita applicate sulla MSS per portare in conto le differenze tra modello CAD 3D e modello FE. Tale soluzione correttiva è applicata maggiormente nei 3 giunti di interfaccia e nei collegamenti tra OSS ed MSS. Esistono, infatti, due tipi di masse distribuite applicate:

- **Massa distribuita per giunti conici**, per la differenza tra i modelli CAD e FE,
- **Massa distribuita su Punto_1, Punto_2 e Punto_3**, per stimare il peso della flangia di interfaccia sulla Piattaforma Nasmyth,
- **Massa distribuita su elementi optomeccanici (M6, M7, M8, DM1, DM2)**, per stimare la massa delle flange di montaggio delle OSS e quelle relative sulla MSS.

Per ulteriori dettagli circa le masse applicate si faccia riferimento al modello FE completo tenendo in considerazione che tutte le masse in gioco sono già inserite nel bilancio complessivo.

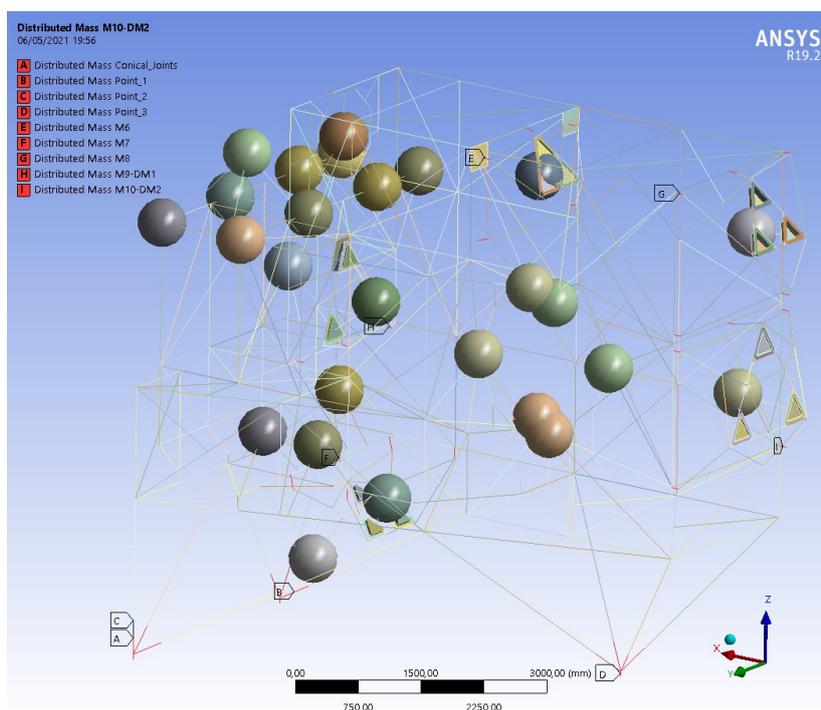


Figura 112. Masse distribuite applicate sulla MSS

Tutte le analisi FEA a livello globale della MSS sono eseguite con un modello leggero a basso numero di nodi e di elementi. I dettagli sono riportati nella tabella seguente e le informazioni sono state estratte direttamente dal software CAE Ansys.

	N° nodi	N° elementi
MORFEO MSS	74764	42442

Figura 113. Dettagli modello FEM

La dimensione del singolo elemento meshato è di circa **17.2 mm** (Figura 114). Questo valore è stato ottenuto impostando un settaggio della mesh di default.

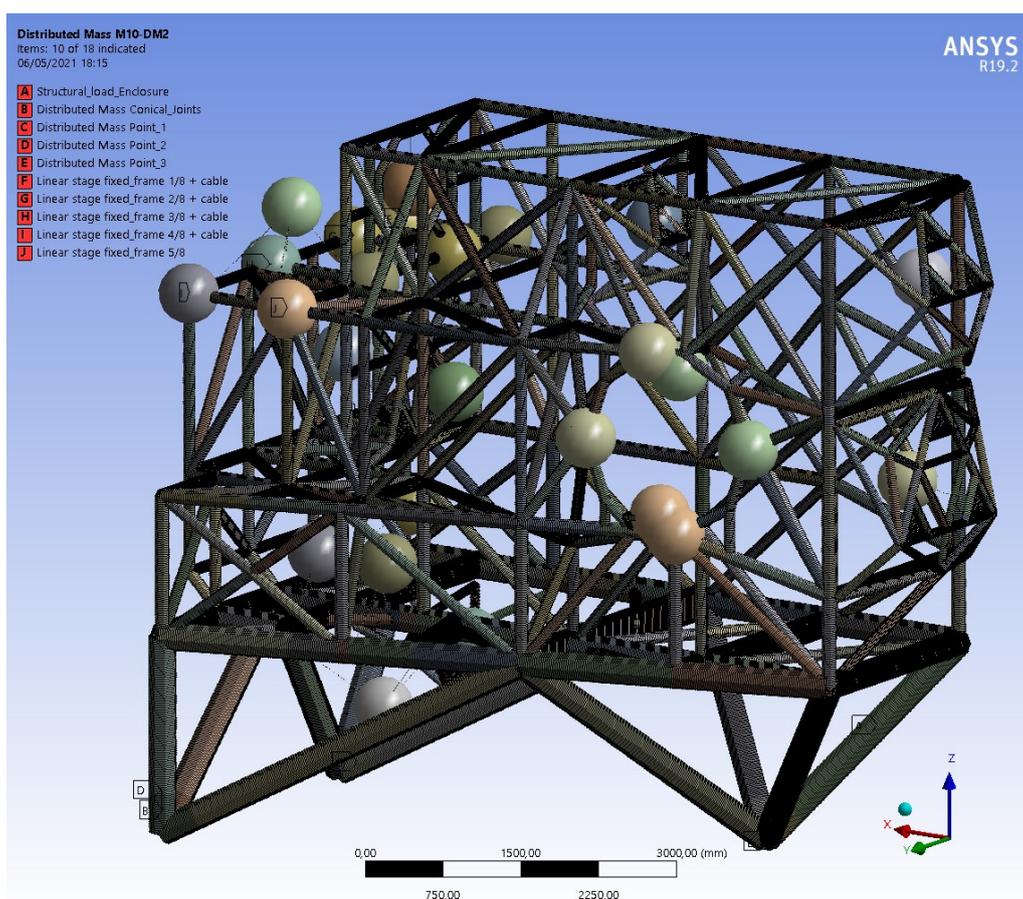


Figura 114. Modello meshato della MSS

5.3 Risultati FEA

Tutto il setting di analisi FEA, atto alla validazione strutturale della MSS, è stato effettuato applicando la configurazione di carico utile contingentato mostrato in precedenza. Di seguito sono riportate le analisi sviluppate, i relativi plot nonché i commenti e le considerazioni sulle stesse.

5.3.1 FEA – Analisi Statica e Modale

L'analisi statica della MSS viene effettuata con la condizione di vincolo e carico spiegata nel capitolo precedente. Per quanto riguarda l'analisi modale dell'intera struttura e solo per essa, invece, è stato eseguito il calcolo anche con le configurazioni di payload netto. Il motivo di questa scelta risiede nel fatto che con le due configurazioni si vanno ad indagare due aspetti ben diversi. L'analisi modale con carico marginato valuta la conformità al requisito ESO, riportato nella documentazione tecnica, in cui la prima frequenza della MSS di MORFEO deve essere superiore a 7 Hz, nel caso peggiore. Effettuando invece un'analisi con massa netta del payload, si sta verificando la “best condition” per la struttura, quindi ci si aspetta di avere una prima frequenza superiore al caso precedente e che ci dia un numero utile a stabile un requisito per i sottosistemi che si installeranno sulla MSS. Si ricorda che la prima frequenza di un sottosistema in ambiente ESO ground-based deve essere:

$$2 f_{\min} (\text{sottosistema}) > f_{\min} (\text{MSS payload netto})$$

I risultati ottenuti sono riportati di seguito:

- **Analisi statica** → Spostamento massimo: **0.45 mm**
- **Analisi statica** → Sollecitazione equivalente massima di Von Mises: **56.14 MPa**
- **Analisi modale (payload lordo)** → Frequenza naturale con il **PRIMO MODO** a **9.69 Hz**
- **Analisi modale (payload netto)** → Frequenza naturale con il **PRIMO MODO** a **10.12 Hz**

Questi risultati emergono per il modello FE complessivo della MSS + carichi utili con una massa totale di 17099 kg. Nello specifico, tutti i risultati precedentemente elencati sono mostrati in forma grafica da Figura 115, 116, 117 e 122. A valle dei plot viene fornita anche una rapida descrizione/commento sui risultati ottenuti. Dove possibile è esplicitato anche il calcolo del fattore di sicurezza.

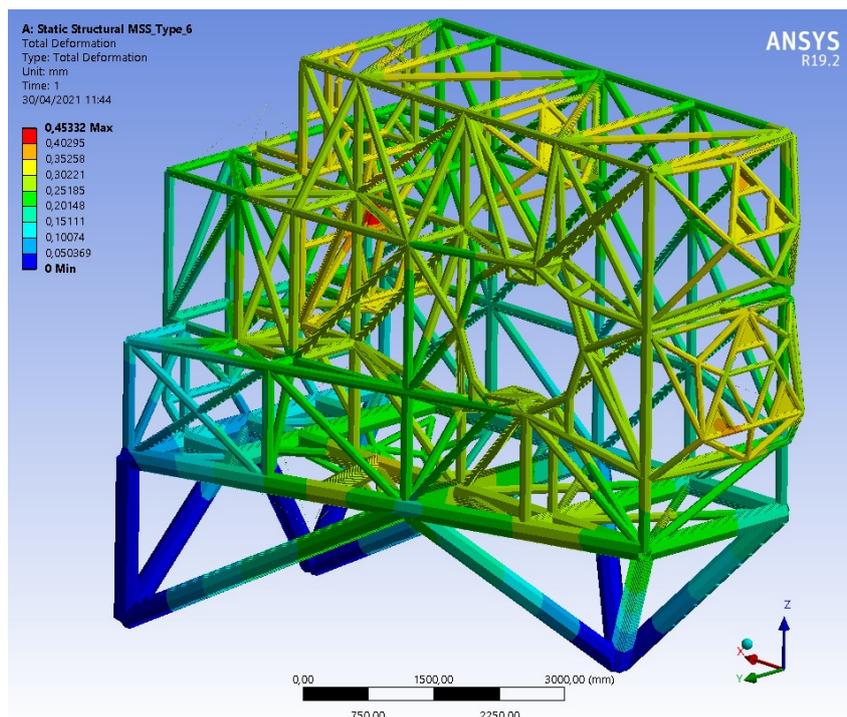


Figura 115. MORFEO MSS spostamento massimo

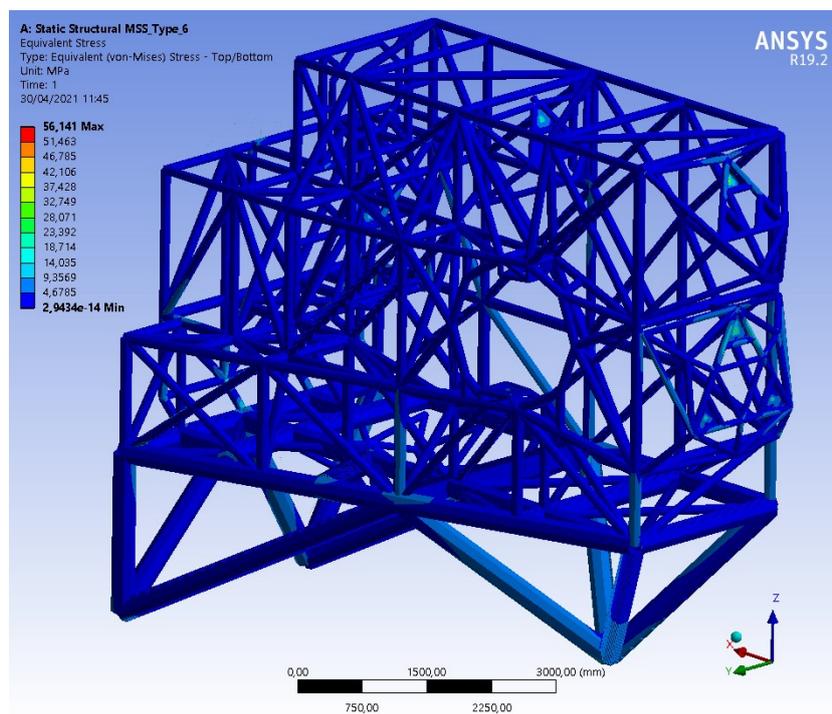


Figura 116. MORFEO MSS Stress equivalente di von Mises

Si può osservare che sia la deformazione massima che le sollecitazioni equivalenti di Von Mises sono molto basse per la struttura in esame. Per la deformazione totale (Figura 115) è chiaro che, nonostante la mappa di colori sia abbastanza graduale e distribuita, la deformazione aumenta in

modo più marcato proprio dove in prossimità delle piastre di interfaccia tra Optomech e OSS. Come prevedibile, si tratta, infatti, di effetti puntuali dovuti all'interfaccia locale tra gli elementi rigidi e gli elementi piastra inseriti nel modello. Nella parte inferiore della struttura, la disposizione geometrica e le sezioni di inerzia scelte opportunamente per le travi, garantiscono una deformazione trascurabile. I risultati dell'analisi statica eseguita, sempre in ambiente Ansys, mostra che lo stress equivalente massimo di von Mises è significativamente basso.

$$\sigma_{\text{yield}} \gg \sigma_{\text{static}} \rightarrow 250 \text{ MPa} \gg 56.14 \text{ MPa}$$

Per questo motivo non è necessario il calcolo della **RF (Reserve Factor)** per l'analisi delle sollecitazioni (vedi documentazione ESO). Infatti, in questo caso abbiamo che:

$$\text{RF} = 250 / (56.14 * 1.1 * 1.15) = 3.52 \gg 1.0$$

Secondo quanto spiegato nel paragrafo 4.5.2, è stata eseguita anche una doppia analisi modale per la MSS, rispettivamente, con payload marginato e netto.

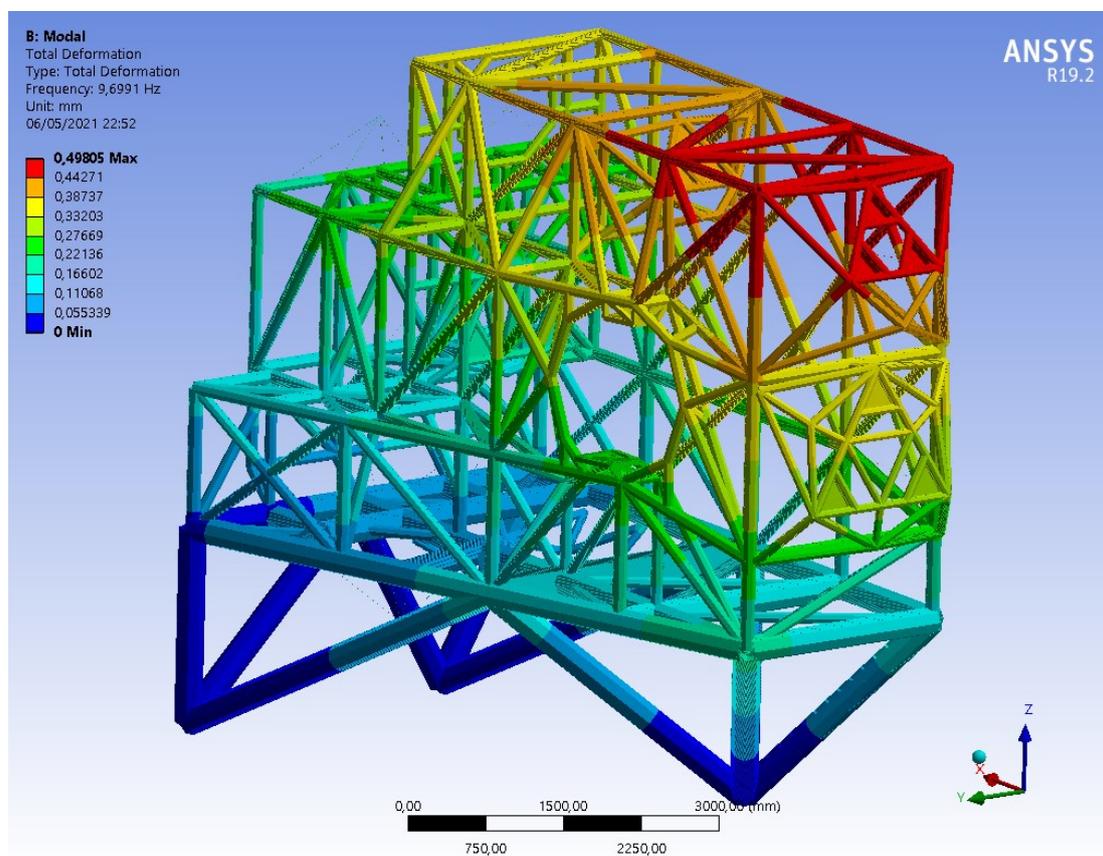


Figura 117. MORFEO MSS Risultati analisi modale (payload lordo): 1° modo

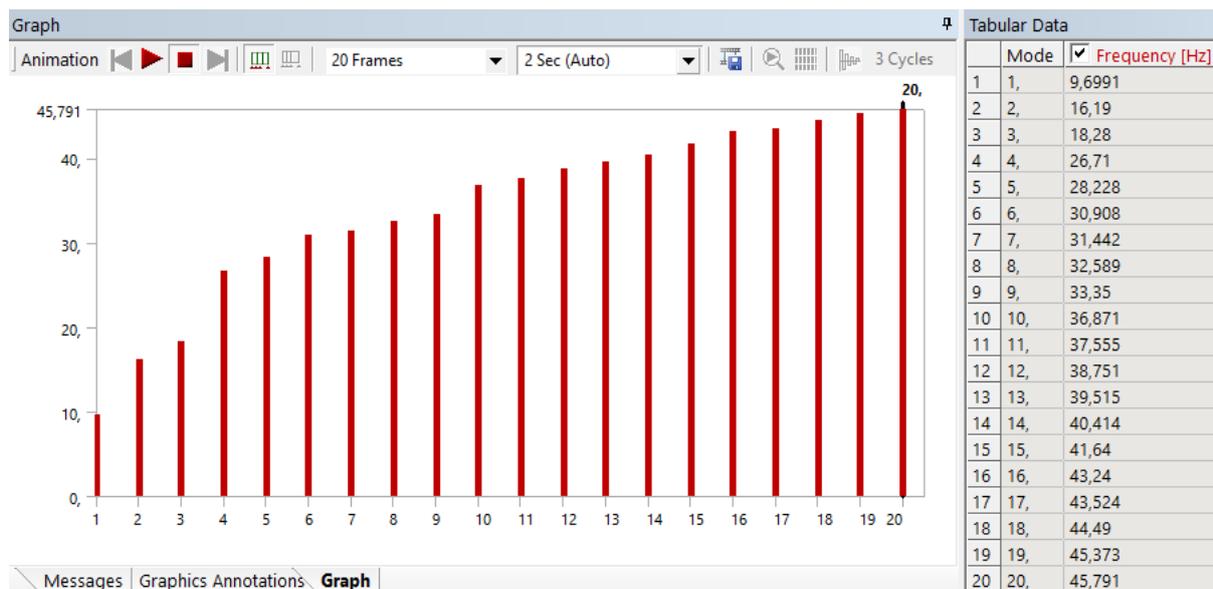


Figura 118. MORFEO MSS Risultati analisi modale (payload lordo): primi 20 modi

La Figura 117 mostra il primo modo di vibrare proprio della struttura in forma grafica, mentre il grafico e la tabella (Figura 118) forniscono i dati salienti per tutti i modi lanciati, dal 1° al 20°. Per avere un riferimento più completo dei primi 5 modi, viene presentata una rapida panoramica dei risultati ottenuti (vedere la Figura 119 e 120 di seguito).

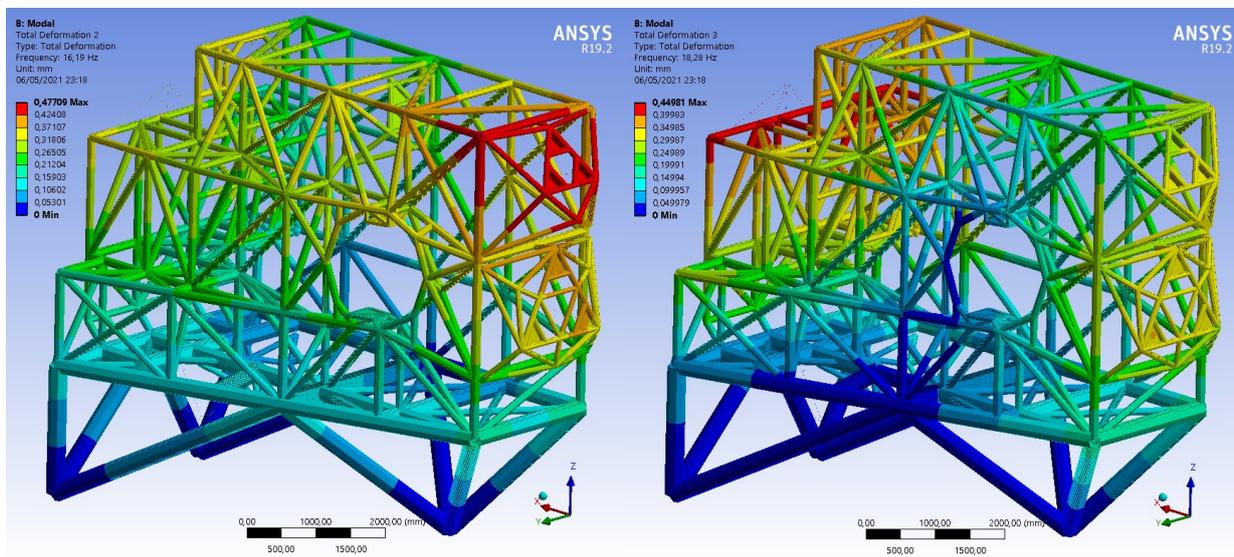


Figura 119. MORFEO MSS Risultati analisi modale (payload lordo): 2° modo (dx) e 3° modo (sx)

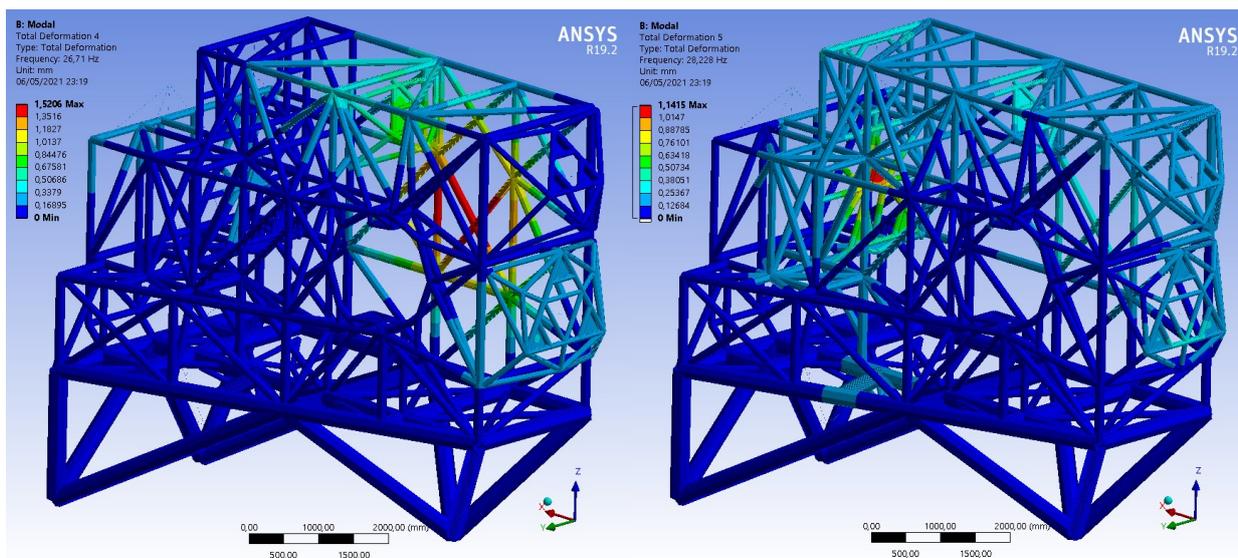


Figura 120. MORFEO MSS Risultati analisi modale (payload lordo): 4° modo (dx) e 5° modo (sx)

Nella tabella seguente (Figura 121) sono presentati i fattori di partecipazione cumulati per i primi 20 modi di vibrare della struttura.

Cumulative participation factors of the first 20 modes	
	Ratio effective mass to total mass
X direction	0.8766
Y direction	0.8282
Z direction	0.7754
Rot X direction	0.4679
Rot Y direction	0.6458
Rot Z direction	0.8587

Figura 121. MORFEO MSS Risultati analisi modale - Fattori di partecipazione

Una seconda analisi è stata eseguita con un payload netto e quindi senza contingenza sui carichi applicati. Nella Figura 122 sono mostrati i risultati ottenuti. Questa analisi modale ha fornito una prima frequenza naturale di **10,12 Hz**. Come era prevedibile, un'alleggerimento del payload applicato ha aumentato significativamente il primo modo della struttura (quasi 0.5 Hz).

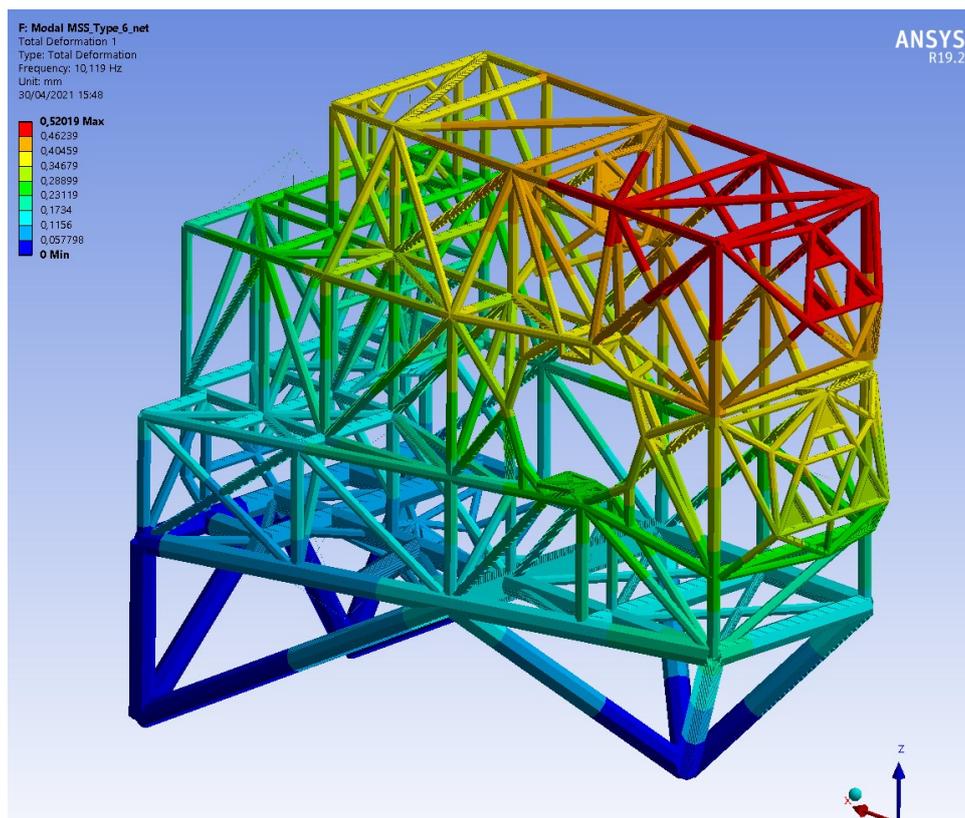


Figura 122. MORFEO MSS Risultati analisi modale (payload netto): 1° modo

5.3.2 FEA – Analisi di Earthquake

Essendo già stato enunciato il procedimento su cui si basa l'analisi sismica (vedi paragrafo 4.5.6), questo paragrafo ha lo scopo di illustrare i risultati e tutte le considerazioni dedotte da tali analisi. È chiaro che, visto lo scopo della MSS di MORFEO, di ospitare ed accogliere sotto-strutture e strumentazione di alto rilievo scientifico, valore economico e di estrema delicatezza, e avendo premesso che il terremoto è la condizione più probante per la struttura in esame, questo potrebbe essere considerato il paragrafo più importante dell'intero post-processing FEA. Infatti, attraverso i risultati numerici di queste analisi, si può imporre il pattern di accelerazioni per i sottosistemi che si installano sulla MSS. Inoltre, essendo un'analisi in condizioni survival, si possono scegliere i materiali di ciascun item, considerando il SF desiderato rispetto ai carichi di snervamento in gioco. Il modello della MSS essendo il driver di sistema per tutti i requisiti meccanici, deve risultare

flessibile e scalabile per seguire facilmente e velocemente qualsiasi evoluzione del progetto. Specialmente in questa fase, quella di *Preliminary Design*, la scelta di modellare con elementi beam 1-D ed elementi plate 2-D, nonché simulare l'optomeccanica tramite una massa concentrata rigidamente collegata alle OSS tramite elementi rigidi 1-D, snellisce di molto l'onere computazionale del modello e lo rende molto flessibile ai cambiamenti in corso d'opera.

Secondo la procedura illustrata nel paragrafo 4.5.6, gli effetti del terremoto vengono valutati effettuando un set di **24 analisi quasi statiche**. La MSS di MORFEO si interfaccia direttamente con la NP. Poiché nel paragrafo precedente il 1° modo di vibrare calcolato per questa struttura è **9.69 Hz** (>7 Hz, ovvero il primo modo più basso richiesto, secondo ESO), le accelerazioni impostate per l'analisi sismica sono riportate in Figura 123. Infatti, come illustrato nel paragrafo 4.5.6, il primo modo della struttura è l'input per leggere le accelerazioni dei terremoti da settare nelle analisi sismiche. In questo caso facendo un'ipotesi conservativa, il primo modo di ingresso è stato interpolato tra 9 e 10 Hz, considerando il loro valore medio (9.5 Hz) e non il valore massimo ottenuto in analisi modale con tutti i carichi utili contingentati (≈ 9.69 Hz). Per simulare gli effetti del terremoto, vengono utilizzati i valori di interpolazione della tabella del documento ESO, per il setting delle accelerazioni quasi statiche.

INS 1st Eigenfrequency	Quasi-static acceleration		
	Current SPEC (x, y, z)	New Horizontal (x, y)	New Vertical (z)
[Hz]	[g]	[g]	[g]
7	3.6	3.6	2.3
8	3.6	3.6	2.25
9	3.6	3.6	2.21
10	3.6	3.00	2.16

Figura 123. Estratto della tabella ESO accelerazioni da Earthquake

Nel caso della MSS di MORFEO i valori attuali di accelerazione utilizzati sono le “accelerazioni intermedie” comprese tra 9 Hz e 10 Hz. Rispettivamente, vengono utilizzati:

New horizontal X	New horizontal Y	New vertical Z
3.3 [g]	3.3 [g]	2.185 [g]

Figura 124. Accelerazioni da Earthquake applicate

I risultati numerici di tutti i **24 load cases** (analisi sismica completa) sono presentati nelle tabelle seguenti. Nella Figura 125 sono presentati le sollecitazioni massime di von Mises dell'intera struttura (1° immagine) e delle sole travi (2° immagine) relative al caso più gravoso testato.

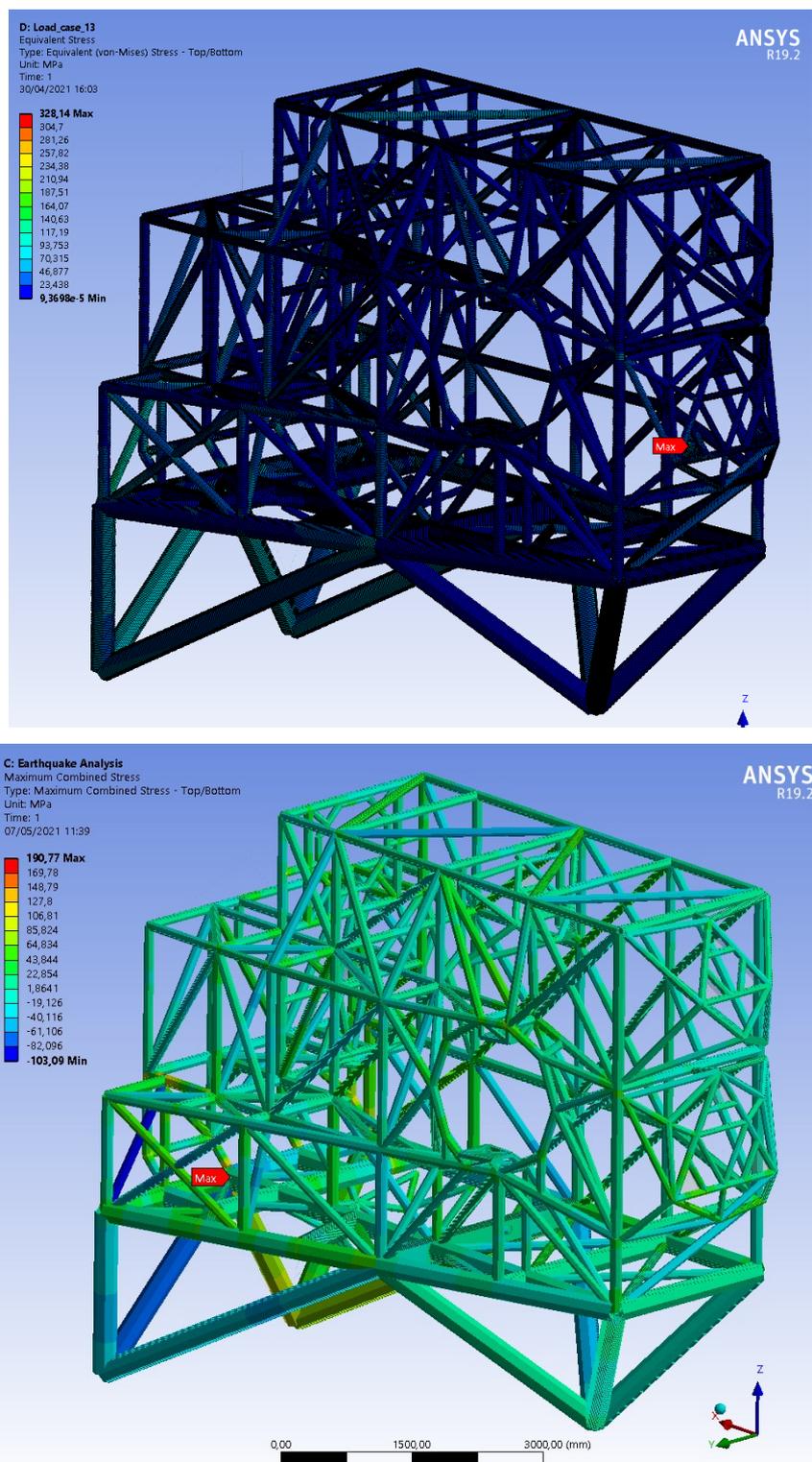


Figura 125. Stress equivalente massimo di von Mises per Load case 13

Load case n°	Acceleration X Component	Acceleration Y Component	Acceleration Z Component	Maximum displac.	Maximum Equivalent von Mises Stress
	mm s ⁻²	mm s ⁻²	mm s ⁻²	mm	MPa
1	32361,78	9708,53	16229,92	4,46	269,21
2	32361,78	9708,53	3383,28	4,21	230,09
3	32361,78	-9708,53	16229,92	9,10	323,45
4	32361,78	-9708,53	3383,28	8,85	277,86
5	-32361,78	9708,53	16229,92	8,48	209,43
6	-32361,78	9708,53	3383,28	8,72	254,05
7	-32361,78	-9708,53	16229,92	4,03	194,98
8	-32361,78	-9708,53	3383,28	4,12	209,58
9	9708,53	32361,78	16229,92	12,04	282,86
10	-9708,53	32361,78	16229,92	14,21	242,75
11	9708,53	32361,78	3383,28	12,15	243,84
12	-9708,53	32361,78	3383,28	14,39	259,61
13	9708,53	-32361,78	16229,92	14,70	328,14
14	-9708,53	-32361,78	16229,92	12,40	206,39
15	9708,53	-32361,78	3383,28	14,50	283,08
16	-9708,53	-32361,78	3383,28	12,23	223,39
17	9708,53	9708,53	31234,02	3,32	200,17
18	9708,53	-9708,53	31234,02	5,84	235,47
19	-9708,53	9708,53	31234,02	4,99	206,73
20	-9708,53	-9708,53	31234,02	3,45	210,82
21	9708,53	9708,53	-11620,82	3,20	98,77
22	9708,53	-9708,53	-11620,82	5,07	98,72
23	-9708,53	9708,53	-11620,82	5,46	165,02
24	-9708,53	-9708,53	-11620,82	3,14	139,95
MAX value				14,7	328,14

Figura 126. Risultati Earthquake: accelerazioni, spostamenti e Stress di Von Mises

Analizzando il load case 13, la Figura 125 mostra che la sollecitazione massima è localizzata su una piastra di interfaccia con un optomeccanica (DM2), mentre sulle travi è inferiore alle prestazioni del comune Structural Steel (250 MPa). Infatti il valore massimo sulla trave è **190.77 MPa**, ed è un risultato puntuale che può essere facilmente migliorato attraverso il re-design locale del sistema, mentre il valore medio della sollecitazione è di circa **70 MPa**.

Per questo motivo lo Structural Steel può essere largamente impiegato su tutta la struttura, mentre per le piastre di interfaccia con le Optomech, fortemente sollecitate, a causa dei contatti tra le



piastre e gli elementi rigidi, è richiesto un materiale più performante. Considerando che le piastre di interfaccia per l'optomeccanica sono elementi intercambiabili, questo non è un grosso problema. Quindi il materiale scelto per la realizzazione delle piastre di interfaccia è il **WELDOX700** (vedi paragrafo 5.2.2). Per valutare il **RF**, secondo documentazione ESO e in accordo con la procedura definita nel paragrafo 4.5.1, si tiene conto delle massime sollecitazioni di von Mises, sia per la piastra di interfaccia che per le sole travi della MSS (avendo scelto materiali differenti). Si ottiene:

$$\sigma_{\text{yieldW700}} > \sigma_{\text{staticIP}} \rightarrow 700 \text{ MPa} \gg 328.14 \text{ MPa}$$

$$\rightarrow \mathbf{RF} = 700 / (328.14 * 1.1 * 1.15) = \mathbf{1.69} > \mathbf{1.0}$$

e

$$\sigma_{\text{yieldStrSteel}} > \sigma_{\text{static_beam}} \rightarrow 250 \text{ MPa} > 190.77 \text{ MPa}$$

$$\rightarrow \mathbf{RF} = 250 / (190.77 * 1.1 * 1.15) = \mathbf{1.04} > \mathbf{1.0}$$

Come precedentemente descritto, la MSS di MORFEO si interfaccia direttamente con la NP, quindi, secondo le procedure ESO, devono essere esaminate e controllate, per ciascun punto di attacco principale, tutte le forze ed i momenti di reazione. I risultati sono presentati nelle tabelle dalla Figura 127 alla Figura 132.

Load case n°	Force Reaction Point_1 X Axis	Force Reaction Point_1 Y Axis	Force Reaction Point_1 Z Axis	Total
	N	N	N	N
1	168426,96	66070,17	-111368,96	212452,24
2	168871,71	65157,67	-172211,49	249839,89
3	279411,30	46790,66	-487838,76	564133,58
4	279856,04	45878,16	-548681,28	617636,92
5	-280535,05	-44485,04	641570,63	701635,03
6	-280090,30	-45397,53	580728,11	646340,97
7	-169550,71	-63764,55	265100,84	321079,14
8	-169105,96	-64677,04	204258,31	272949,46
9	-118191,47	49868,61	591374,66	605128,16
10	-252880,07	16702,05	817256,54	855649,19
11	-117746,72	48956,11	530532,14	545642,13
12	-252435,32	15789,55	756414,01	797580,76
13	251756,32	-14396,42	-663524,66	709826,37
14	117067,71	-47562,99	-437642,78	455519,81
15	252201,06	-15308,92	-724367,19	767168,54
16	117512,46	-48475,48	-498485,31	514438,19
17	10770,82	28441,59	223220,25	225282,52
18	121755,15	9162,08	-153249,55	195943,06
19	-123917,78	-4724,97	449102,13	465908,43
20	-12933,45	-24004,48	72632,33	77581,86
21	12254,44	25397,61	20257,02	34721,13
22	123238,78	6118,10	-356212,78	376978,48
23	-122434,16	-7768,95	246138,90	275017,88
24	-11449,82	-27048,46	-130330,90	133599,63
MAX	279856,0	66070,2	817256,5	
MIN	-280535,0	-64677,0	-724367,2	

Figura 127. Risultati Earthquake: forze di reazione per il Point_1

Load case n°	Force Reaction Point_2 X Axis	Force Reaction Point_2 Y Axis	Force Reaction Point_2 Z Axis	Total
	N	N	N	N
1	177257,05	56191,03	-137960,93	231539,87
2	193477,42	66835,76	-177754,83	271103,87
3	47299,52	-154610,94	238508,87	288146,26
4	63519,89	-143966,21	198714,97	253473,25
5	-88283,82	127714,73	-137960,93	207697,62
6	-72063,45	138359,45	-177754,83	236502,13
7	-218241,36	-83087,24	238508,87	333795,24
8	-202020,98	-72442,52	198714,97	292485,96
9	235934,86	327159,96	-577175,69	704152,45
10	156272,60	348617,07	-577175,69	692160,94
11	252155,24	337804,68	-616969,59	747225,36
12	172492,97	359261,79	-616969,59	734489,17
13	-197256,91	-375513,28	677723,64	799518,50
14	-276919,17	-354056,17	677723,64	813233,87
15	-181036,53	-364868,55	637929,74	756873,59
16	-260698,79	-343411,45	637929,74	769967,29
17	65373,34	68791,94	-91484,08	131815,56
18	-64584,19	-142010,03	284985,72	324892,02
19	-14288,93	90249,05	-91484,08	129299,66
20	-144246,46	-120552,92	284985,72	341404,31
21	119482,53	104301,44	-224231,67	274653,79
22	-10475,01	-106500,53	152238,13	186087,44
23	39820,26	125758,54	-224231,67	260155,16
24	-90137,27	-85043,43	152238,13	196299,67
MAX	252155,2	359261,8	677723,6	
MIN	-276919,2	-375513,3	-616969,6	

Figura 128. Risultati Earthquake: forze di reazione per il Point_2

Load case n°	Force Reaction Point_3 X Axis	Force Reaction Point_3 Y Axis	Force Reaction Point_3 Z Axis	Total
	N	N	N	N
1	205248,62	43018,58	525630,95	565920,04
2	188583,50	33286,36	407563,81	450310,98
3	224221,82	-57459,51	525630,95	574338,67
4	207556,69	-67191,74	407563,81	462279,97
5	-182113,76	82050,10	-227308,65	302600,17
6	-198778,88	72317,87	-345375,78	405002,90
7	-163140,56	-18428,00	-227308,65	280399,10
8	-179805,69	-28160,22	-345375,78	390394,05
9	47536,39	173904,06	262102,09	318119,22
10	-68672,32	185613,51	36220,21	201196,84
11	30871,27	164171,83	144034,96	220570,84
12	-85337,44	175881,29	-81846,92	211933,07
13	110780,38	-161022,93	262102,09	326952,87
14	-5428,34	-149313,48	36220,21	153739,66
15	94115,26	-170755,15	144034,96	242406,83
16	-22093,46	-159045,70	-81846,92	180229,23
17	89135,63	68046,26	399997,29	415419,41
18	108108,83	-32431,84	399997,29	415616,62
19	-27073,08	79755,71	174115,41	193416,91
20	-8099,89	-20722,39	174115,41	175531,20
21	33542,82	35580,74	6139,75	49282,92
22	52516,02	-64897,35	6139,75	83709,59
23	-82665,89	47290,20	-219742,13	239492,41
24	-63692,70	-53187,90	-219742,13	234887,88
MAX	224221,8	185613,5	525630,9	
MIN	-198778,9	-170755,2	-345375,8	

Figura 129. Risultati Earthquake: forze di reazione per il Point_3



Load case n°	Moment Reaction Point_1 X	Moment Reaction Point_1 Y	Moment Reaction Point_1 Z
	Axis	Axis	Axis
	N mm	N mm	N mm
1	-4095211,976	10438676,02	0
2	-4038637,088	10466250,38	0
3	-2902159,65	17319704,8	0
4	-2845584,762	17347279,16	0
5	2759210,888	-17389377,41	0
6	2815785,776	-17361803,05	0
7	3952263,214	-10508348,63	0
8	4008838,102	-10480774,27	0
9	-3088058,353	-7329009,585	0
10	-1031731,494	-15677425,61	0
11	-3031483,466	-7301435,232	0
12	-975156,6067	-15649851,26	0
13	888782,7328	15607753,01	0
14	2945109,592	7259336,983	0
15	945357,6202	15635327,36	0
16	3001684,479	7286911,336	0
17	-1762239,987	666652,164	0
18	-569187,6609	7547680,943	0
19	294086,8725	-7681763,865	0
20	1487139,198	-800735,086	0
21	-1573513,072	758636,8374	0
22	-380460,7464	7639665,616	0
23	482813,787	-7589779,192	0
24	1675866,113	-708750,4127	0
MAX	4008838,1	17347279,2	0,0
MIN	-4095212,0	-17389377,4	0,0

Figura 130. Risultati Earthquake: momenti di reazione per il Point_1

Load case n°	Moment Reaction Point_2 X Axis N mm	Moment Reaction Point_2 Y Axis N mm	Moment Reaction Point_2 Z Axis N mm
1	-3482735,051	10986240,13	0
2	-4142707,876	11991903,36	0
3	9584769,002	2928873,238	0
4	8924796,177	3934536,467	0
5	-7917204,078	-5469900,176	0
6	-8577176,903	-4464236,947	0
7	5150299,975	-13527267,07	0
8	4490327,15	-12521603,84	0
9	-20280220,61	14626852,4	0
10	-21610561,31	9690010,304	0
11	-20940193,43	15632515,63	0
12	-22270534,14	10695673,53	0
13	23278126,24	-12231037,24	0
14	21947785,53	-17167879,33	0
15	22618153,41	-11225374,01	0
16	21287812,7	-16162216,1	0
17	-4263991,254	4052037,785	0
18	8803512,799	-4005329,107	0
19	-5594331,962	-884804,3067	0
20	7473172,091	-8942171,198	0
21	-6465579,991	7406807,489	0
22	6601924,062	-650559,4024	0
23	-7795920,699	2469965,398	0
24	5271583,354	-5587401,494	0
MAX	23278126,2	15632515,6	0,0
MIN	-22270534,1	-17167879,3	0,0

Figura 131. Risultati Earthquake: momenti di reazione per il Point_2

Load case n°	Moment Reaction Point_3 X	Moment Reaction Point_3 Y	Moment Reaction Point_3 Z
	Axis	Axis	Axis
	N mm	N mm	N mm
1	-2666220,14	12722307,73	0
2	-2062822,202	11689070,15	0
3	3561557,813	13898645,84	0
4	4164955,751	12865408,26	0
5	-5086173,976	-11287946,3	0
6	-4482776,038	-12321183,89	0
7	1141603,977	-10111608,19	0
8	1745001,915	-11144845,78	0
9	-10778944,93	2946324,356	0
10	-11504931,08	-4256751,856	0
11	-10175546,99	1913086,773	0
12	-10901533,14	-5289989,438	0
13	9980314,916	6867451,396	0
14	9254328,765	-335624,8157	0
15	10583712,85	5834213,813	0
16	9857726,703	-1368862,398	0
17	-4217935,925	5525477,217	0
18	2009842,028	6701815,329	0
19	-4943922,076	-1677598,994	0
20	1283855,877	-501260,882	0
21	-2205074,103	2078722,84	0
22	4022703,851	3255060,952	0
23	-2931060,253	-5124353,372	0
24	3296717,7	-3948015,26	0
MAX	10583712,9	13898645,8	0,0
MIN	-11504931,1	-12321183,9	0,0

Figura 132. Risultati Earthquake: momenti di reazione per il Point_3

Considerando i risultati mostrati in precedenza, devono essere calcolati i fattori di sicurezza sulle forze e momenti di reazione alla NP, secondo le specifiche ESO. Le tabelle, dalla Figura 127 alla Figura 132, presentano, in fondo, i risultati numerici più elevati evidenziati con colori diversi per ciascuna direzione. Per la MSS di MORFEO abbiamo una sola tipologia di punto di appoggio sulla NP, ovvero il punto di interfaccia “MAIN”. Per i carichi e le caratteristiche fare riferimento alla documentazione tecnica ESO o al capitolo 4.5.6. Per studiare le forze di reazione di tutti i 24 casi di carico è stato calcolato il calcolo di SF per i valori massimi per il Punto_1, Punto_2 e Punto_3. Sono stati considerati anche i limiti delle forze e dei momenti disponibili per i punti di appoggio

MIAN. Per quanto riguarda le forze di reazione, poiché i limiti per le direzioni X, Y e Z sono diversi, il SF viene valutato separatamente per ciascuna direzione:

$$SF_{\min} = F(x,y)_{\text{allowable}}/F(x,y)_{\text{MAX}} \rightarrow 500000/375513,3 = 1,33 > 1,3$$

$$SF_{\min} = F(+z)_{\text{allowable}}/F(+z)_{\text{MAX}} \rightarrow 1000000/724367,2 = 1,38 > 1,3$$

$$SF_{\min} = F(-z)_{\text{allowable}}/F(-z)_{\text{MAX}} \rightarrow 1250000/817256,5 = 1,53 > 1,3$$

Una procedura simile può essere eseguita per valutare il fattore di sicurezza dei momenti. Il calcolo del valore ammissibile del momento è riportato come segue:

$$M(x,y,z)_{\text{allowable}} = F_{\max} \times h_e \rightarrow 1250000 \times (0,1 \times 260) = 32500000 \text{ N mm} \rightarrow 32,5 \text{ kN m}$$

Dove F_{\max} è il valore massimo della forza ammissibile sul punto di appoggio della NP e h_e è il valore massimo dell'eccentricità per le flange main. Per maggiori dettagli sulle dimensioni delle flange fare riferimento ai dwg ESO.

Come si può notare dalle tabelle relative ai valori dei momenti, essendo le forze lungo la direzione Z applicate sempre senza eccentricità, queste sono sempre nulle. Quindi, il calcolo viene sviluppato soltanto per le direzioni X e Y.

$$SF_{\min X} = M(x)_{\text{allowable}}/M(x)_{\text{MAX}} \rightarrow 32500000/23278126,2 = 1,40 > 1,3$$

$$SF_{\min Y} = M(y)_{\text{allowable}}/M(y)_{\text{MAX}} \rightarrow 32500000/17389377,4 = 1,86 > 1,3$$

5.3.3 FEA – Analisi da vento

Il paragrafo 4.5.4 illustra la procedura per eseguire le analisi da vento. Per valutare gli effetti del vento sulla MSS, viene impostata la forza aerodinamica come carico esterno alla struttura.

Il modello usato per questa FEA è lo stesso di quello impiegato in analisi statica.

Le analisi vengono eseguite separatamente lungo due direzioni, come mostrato nella Figura 133:

- a. direzione +Y, agente sul lato destro dello strumento MORFEO
- b. direzione +X, agente sul lato esterno dello strumento MORFEO

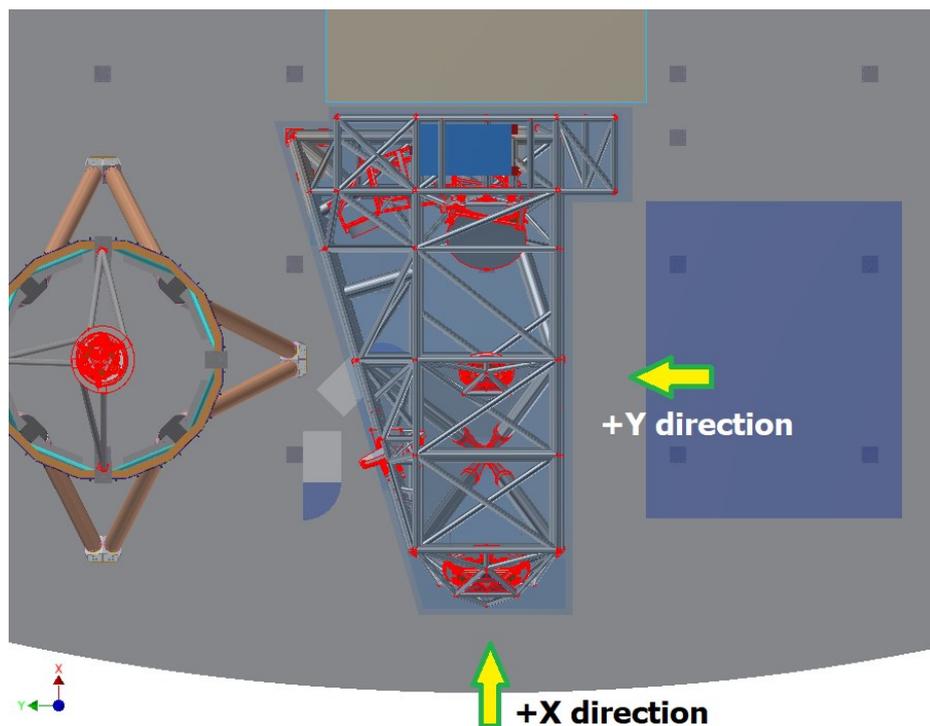


Figura 133. Direzioni vento su MORFEO

Per ciascuna condizione di carico, la forza esterna dovuto all'azione del vento insiste sull'area proiettata sul piano normale rispetto alla direzione di carico in esame. Per distinguere chiaramente le due superfici, in base alla nomenclatura già definita nel paragrafo 4.5.4, avremo:

$$A_{\text{sectY}} = 47 \text{ m}^2$$

$$A_{\text{sectX}} = 16 \text{ m}^2$$

Gli altri parametri da settare, per i casi illustrati, sono riportati nella figura seguente (Figura 134).

	Operational	Functional	Survival
Air density	0.87kg/m ³ (Median)		0.92kg/m ³
Air Pressure	712 mbar ± 50 mbar		N/A
Air Temperature	0°C to +15°C	-5°C to +20°C	-10°C to +25°C
Air temperature gradient at night time	-0.55°C/h to +0.5°C/h	-1.0 °C/h to +1.4°C/h	-10.0°C/h to +10.0°C/h (over 30 min) -5.0°C/h to +5.0°C/h (over 1 h)
Relative Humidity range	5% to 80%		3% to 100% with condensation
Average wind speed	<2 m/s	<3 m/s	<16 m/s
Sky temperature	-50 °C		

Figura 134. Condizioni nominali operative per gli strumenti in NP

In un primo momento vengono valutate le **condizioni operative** (velocità media del vento, **2 m/s**), al fine di verificare la stabilità del sistema. I carichi esterni vengono valutati partendo dalla velocità del vento e calcolando la **resistenza/forza aerodinamica** per entrambe le direzioni della struttura (R_a), attraverso la formula:

$$R_{a\ opY} = \frac{1}{2} \rho \times v^2 \times A_{sectY} \times C_R = \frac{1}{2} 0.87 \times 2^2 \times 47 \times 1 = \mathbf{81.78\ N} \rightarrow \mathbf{82\ N}$$

$$R_{a\ opX} = \frac{1}{2} \rho \times v^2 \times A_{sectX} \times C_R = \frac{1}{2} 0.87 \times 2^2 \times 16 \times 1 = \mathbf{27.84\ N} \rightarrow \mathbf{28\ N}$$

dove:

- ρ è la densità dell'aria [kg/m³]
- v è la velocità media del vento [m/s]
- A_{sect} l'area della sezione normale retta (L alla direzione del carico)
- C_R è il coefficiente di resistenza aerodinamica per l'area di riferimento

Nelle particolari applicazioni eseguite per la MSS, poiché le superfici investigate sono normali alla direzione del vento, si ha sempre un $C_R = 1$.

In seconda istanza, al fine di verificare il rispetto dei limiti di sopravvivenza della struttura (MSS) ai carichi da vento anche le **condizioni di sopravvivenza** vengono esaminate (velocità media del vento, **16 m/s**). Come per le condizioni operative, la R_a è calcolata in entrambe le direzioni.

$$R_{a\ survY} = \frac{1}{2} \rho \times v^2 \times A_{sectY} \times C_R = \frac{1}{2} 0.92 \times 16^2 \times 47 \times 1 = \mathbf{5534.72\ N} \rightarrow \mathbf{5535\ N}$$

$$R_{a\ survX} = \frac{1}{2} \rho \times v^2 \times A_{sectX} \times C_R = \frac{1}{2} 0.92 \times 16^2 \times 16 \times 1 = \mathbf{1884.16\ N} \rightarrow \mathbf{1885\ N}$$

Di seguito, tutti i risultati ottenuti dalla FEA sono riportati in forma tabellare. Gli output di tale analisi sono le deformazioni e le rotazioni del CoG di ciascun elemento optomeccanico (da Figura 135 a Figura 138). Le tabelle riportano tre condizioni di carico: statico, operativo e di sopravvivenza. I Δ risultanti per ogni condizione di carico di interesse, quindi operativa o survival, decurtati della statica al fine di ottenere il solo contributo del carico da vento, sono evidenziati in verde.

Name	Units	STATIC	OPERATIONAL + STATIC	SURVIVAL + STATIC	$\Delta_{OPERATIONAL}$	$\Delta_{SURVIVAL}$
WIND CONTRIBUTE ALONG Y+	[N]	0,01	82	5535	OPERATIONAL + STATIC - STATIC = OPERATIONAL	SURVIVAL + STATIC - STATIC = SURVIVAL
Deformation Probe SP X Axis	[mm]	-0,109760	-0,110158	-0,136669	-0,000399	-0,026910
Deformation Probe SP Y Axis	[mm]	-0,054616	-0,053143	0,044871	0,001474	0,099487
Deformation Probe SP Z Axis	[mm]	-0,277802	-0,277581	-0,262873	0,000221	0,014929
Deformation Probe M6 X Axis	[mm]	-0,072248	-0,072916	-0,117333	-0,000668	-0,045085
Deformation Probe M6 Y Axis	[mm]	-0,064412	-0,062286	0,079093	0,002126	0,143505
Deformation Probe M6 Z Axis	[mm]	-0,351504	-0,351081	-0,322920	0,000423	0,028585
Deformation Probe M7 X Axis	[mm]	-0,016883	-0,017060	-0,028819	-0,000177	-0,011936
Deformation Probe M7 Y Axis	[mm]	-0,001766	-0,001526	0,014414	0,000240	0,016180
Deformation Probe M7 Z Axis	[mm]	-0,295315	-0,295188	-0,286759	0,000127	0,008556
Deformation Probe M8 X Axis	[mm]	-0,107176	-0,107547	-0,132217	-0,000371	-0,025041
Deformation Probe M8 Y Axis	[mm]	0,071930	0,073985	0,210660	0,002055	0,138729
Deformation Probe M8 Z Axis	[mm]	-0,389307	-0,389407	-0,396055	-0,000100	-0,006748
Deformation Probe M9/DM1 X Axis	[mm]	-0,145035	-0,145312	-0,163749	-0,000277	-0,018714
Deformation Probe M9/DM1 Y Axis	[mm]	-0,077412	-0,076575	-0,020866	0,000838	0,056546
Deformation Probe M9/DM1 Z Axis	[mm]	-0,422397	-0,422201	-0,409157	0,000196	0,013240
Deformation Probe M10/DM2 X Axis	[mm]	-0,112667	-0,112931	-0,130482	-0,000264	-0,017815
Deformation Probe M10/DM2 Y Axis	[mm]	0,072237	0,073593	0,163808	0,001356	0,091572
Deformation Probe M10/DM2 Z Axis	[mm]	-0,424322	-0,424414	-0,430581	-0,000093	-0,006259
Deformation Probe DC+FM1 X Axis	[mm]	-0,179103	-0,179323	-0,193958	-0,000220	-0,014855
Deformation Probe DC+FM1 Y Axis	[mm]	-0,033262	-0,032870	-0,006747	0,000393	0,026515
Deformation Probe DC+FM1 Z Axis	[mm]	-0,212268	-0,212133	-0,203129	0,000135	0,009139
Deformation Probe M11 X Axis	[mm]	-0,082277	-0,082551	-0,100764	-0,000274	-0,018487
Deformation Probe M11 Y Axis	[mm]	0,013499	0,014474	0,079291	0,000975	0,065792
Deformation Probe M11 Z Axis	[mm]	-0,272891	-0,273261	-0,297877	-0,000370	-0,024986

Figura 135. Δ spostamenti (deformation probe) lungo Y+

Name	Units	STATIC	OPERATIONAL + STATIC	SURVIVAL + STATIC	$\Delta_{OPERATIONAL}$	$\Delta_{SURVIVAL}$
WIND CONTRIBUTE ALONG Y+	[N]	0,01	82	5535	OPERATIONAL + STATIC - STATIC = OPERATIONAL	SURVIVAL + STATIC - STATIC = SURVIVAL
Flexible Rotation Probe SP X Axis	[degree]	-0,001327	-0,001346	-0,002633	-0,000019	-0,001306
Flexible Rotation Probe SP Y Axis	[degree]	0,001843	0,001841	0,001705	-0,000002	-0,000138
Flexible Rotation Probe SP Z Axis	[degree]	0,000166	0,000171	0,000492	0,000005	0,000326
Flexible Rotation Probe M6 X Axis	[degree]	-0,002736	-0,002746	-0,003368	-0,000009	-0,000632
Flexible Rotation Probe M6 Y Axis	[degree]	0,012283	0,012297	0,013210	0,000014	0,000927
Flexible Rotation Probe M6 Z Axis	[degree]	-0,000445	-0,000454	-0,001069	-0,000009	-0,000624
Flexible Rotation Probe M7 X Axis	[degree]	-0,001893	-0,001899	-0,002277	-0,000006	-0,000384
Flexible Rotation Probe M7 Y Axis	[degree]	-0,006226	-0,006226	-0,006212	0,000000	0,000015
Flexible Rotation Probe M7 Z Axis	[degree]	-0,001782	-0,001782	-0,001756	0,000000	0,000026
Flexible Rotation Probe M8 X Axis	[degree]	-0,001261	-0,001278	-0,002402	-0,000017	-0,001141
Flexible Rotation Probe M8 Y Axis	[degree]	0,018609	0,018604	0,018294	-0,000005	-0,000314
Flexible Rotation Probe M8 Z Axis	[degree]	-0,001916	-0,001915	-0,001871	0,000001	0,000045
Flexible Rotation Probe M9/DM1 X Axis	[degree]	-0,000825	-0,000838	-0,001174	-0,000014	-0,000917
Flexible Rotation Probe M9/DM1 Y Axis	[degree]	-0,018836	-0,018839	-0,019036	-0,000003	-0,000200
Flexible Rotation Probe M9/DM1 Z Axis	[degree]	-0,000246	-0,000242	-0,000011	0,000003	0,000235
Flexible Rotation Probe M10/DM2 X Axis	[degree]	-0,000942	-0,000961	-0,002227	-0,000019	-0,001285
Flexible Rotation Probe M10/DM2 Y Axis	[degree]	0,019791	0,019785	0,019403	-0,000006	-0,000388
Flexible Rotation Probe M10/DM2 Z Axis	[degree]	-0,000072	-0,000073	-0,000133	-0,000001	-0,000060
Flexible Rotation Probe DC+FM1 X Axis	[degree]	0,000922	0,000915	0,000408	-0,000008	-0,000514
Flexible Rotation Probe DC+FM1 Y Axis	[degree]	-0,007822	-0,007823	-0,007923	-0,000002	-0,000101
Flexible Rotation Probe DC+FM1 Z Axis	[degree]	-0,000606	-0,000609	-0,000788	-0,000003	-0,000182
Flexible Rotation Probe M11 X Axis	[degree]	0,001018	0,001007	0,000264	-0,000011	-0,000755
Flexible Rotation Probe M11 Y Axis	[degree]	0,001462	0,001447	0,000474	-0,000015	-0,000987
Flexible Rotation Probe M11 Z Axis	[degree]	-0,000536	-0,000542	-0,000928	-0,000006	-0,000392

Figura 136. Δ rotazioni (flexible rotation probe) lungo Y+

Name	Units	STATIC	OPERATIONAL + STATIC	SURVIVAL + STATIC	$\Delta_{OPERATIONAL}$	$\Delta_{SURVIVAL}$
WIND CONTRIBUTE ALONG X+	[N]	0,01	28	1885	OPERATIONAL + STATIC - STATIC = OPERATIONAL	SURVIVAL + STATIC - STATIC = SURVIVAL
Deformation Probe SP X Axis	[mm]	-0,109759	-0,109565	-0,096690	0,000194	0,013070
Deformation Probe SP Y Axis	[mm]	-0,054616	-0,054719	-0,061524	-0,000103	-0,006907
Deformation Probe SP Z Axis	[mm]	-0,277802	-0,277840	-0,280362	-0,000038	-0,002560
Deformation Probe M6 X Axis	[mm]	-0,072248	-0,072043	-0,058423	0,000205	0,013825
Deformation Probe M6 Y Axis	[mm]	-0,064412	-0,064535	-0,072738	-0,000124	-0,008326
Deformation Probe M6 Z Axis	[mm]	-0,351505	-0,351481	-0,349952	0,000023	0,001552
Deformation Probe M7 X Axis	[mm]	-0,016883	-0,016803	-0,011480	0,000080	0,005403
Deformation Probe M7 Y Axis	[mm]	-0,001766	-0,001789	-0,003304	-0,000023	-0,001538
Deformation Probe M7 Z Axis	[mm]	-0,295315	-0,295329	-0,296282	-0,000014	-0,000967
Deformation Probe M8 X Axis	[mm]	-0,107176	-0,106945	-0,091662	0,000230	0,015514
Deformation Probe M8 Y Axis	[mm]	0,071930	0,071770	0,061138	-0,000160	-0,010792
Deformation Probe M8 Z Axis	[mm]	-0,389307	-0,389242	-0,384953	0,000065	0,004354
Deformation Probe M9/DM1 X Axis	[mm]	-0,145035	-0,144901	-0,135987	0,000134	0,009048
Deformation Probe M9/DM1 Y Axis	[mm]	-0,077412	-0,077467	-0,081110	-0,000055	-0,003697
Deformation Probe M9/DM1 Z Axis	[mm]	-0,422397	-0,422422	-0,424053	-0,000025	-0,001656
Deformation Probe M10/DM2 X Axis	[mm]	-0,112667	-0,112499	-0,101355	0,000168	0,011312
Deformation Probe M10/DM2 Y Axis	[mm]	0,072236	0,072113	0,063951	-0,000123	-0,008285
Deformation Probe M10/DM2 Z Axis	[mm]	-0,424322	-0,424241	-0,418893	0,000081	0,005429
Deformation Probe DC+FM1 X Axis	[mm]	-0,179103	-0,179012	-0,173010	0,000090	0,006093
Deformation Probe DC+FM1 Y Axis	[mm]	-0,033262	-0,033303	-0,035977	-0,000040	-0,002715
Deformation Probe DC+FM1 Z Axis	[mm]	-0,212268	-0,212283	-0,213274	-0,000015	-0,001006
Deformation Probe M11 X Axis	[mm]	-0,082277	-0,082145	-0,073384	0,000132	0,008893
Deformation Probe M11 Y Axis	[mm]	0,013499	0,013394	0,006439	-0,000105	-0,007060
Deformation Probe M11 Z Axis	[mm]	-0,272891	-0,272809	-0,267404	0,000081	0,005487

Figura 137. Δ spostamenti (deformation probe) lungo X+

Name	Units	STATIC	OPERATIONAL + STATIC	SURVIVAL + STATIC	$\Delta_{OPERATIONAL}$	$\Delta_{SURVIVAL}$
WIND CONTRIBUTE ALONG X+	[N]	0,01	28	1885	OPERATIONAL + STATIC - STATIC = OPERATIONAL	SURVIVAL + STATIC - STATIC = SURVIVAL
Flexible Rotation Probe SP X Axis	[degree]	-0,001327	-0,001325	-0,001228	0,000001	0,000099
Flexible Rotation Probe SP Y Axis	[degree]	0,001843	0,001845	0,001975	0,000002	0,000132
Flexible Rotation Probe SP Z Axis	[degree]	0,000166	0,000166	0,000116	-0,000001	-0,000050
Flexible Rotation Probe M6 X Axis	[degree]	-0,002736	-0,002735	-0,002634	0,000002	0,000103
Flexible Rotation Probe M6 Y Axis	[degree]	0,012283	0,012285	0,012419	0,000002	0,000136
Flexible Rotation Probe M6 Z Axis	[degree]	-0,000445	-0,000445	-0,000444	0,000000	0,000001
Flexible Rotation Probe M7 X Axis	[degree]	-0,001893	-0,001893	-0,001863	0,000000	0,000030
Flexible Rotation Probe M7 Y Axis	[degree]	-0,006226	-0,006226	-0,006235	0,000000	-0,000008
Flexible Rotation Probe M7 Z Axis	[degree]	-0,001782	-0,001783	-0,001797	0,000000	-0,000014
Flexible Rotation Probe M8 X Axis	[degree]	-0,001261	-0,001259	-0,001170	0,000001	0,000090
Flexible Rotation Probe M8 Y Axis	[degree]	0,018609	0,018614	0,018985	0,000006	0,000377
Flexible Rotation Probe M8 Z Axis	[degree]	-0,001916	-0,001915	-0,001881	0,000001	0,000035
Flexible Rotation Probe M9/DM1 X Axis	[degree]	-0,000825	-0,000824	-0,000759	0,000001	0,000066
Flexible Rotation Probe M9/DM1 Y Axis	[degree]	-0,018836	-0,018835	-0,018737	0,000001	0,000099
Flexible Rotation Probe M9/DM1 Z Axis	[degree]	-0,000246	-0,000246	-0,000276	0,000000	-0,000030
Flexible Rotation Probe M10/DM2 X Axis	[degree]	-0,000942	-0,000941	-0,000853	0,000001	0,000089
Flexible Rotation Probe M10/DM2 Y Axis	[degree]	0,019791	0,019795	0,020045	0,000004	0,000254
Flexible Rotation Probe M10/DM2 Z Axis	[degree]	-0,000072	-0,000072	-0,000074	0,000000	-0,000001
Flexible Rotation Probe DC+FM1 X Axis	[degree]	0,000922	0,000923	0,000979	0,000001	0,000057
Flexible Rotation Probe DC+FM1 Y Axis	[degree]	-0,007822	-0,007821	-0,007790	0,000000	0,000032
Flexible Rotation Probe DC+FM1 Z Axis	[degree]	-0,000606	-0,000606	-0,000583	0,000000	0,000023
Flexible Rotation Probe M11 X Axis	[degree]	0,001018	0,001020	0,001150	0,000002	0,000131
Flexible Rotation Probe M11 Y Axis	[degree]	0,001462	0,001462	0,001482	0,000000	0,000020
Flexible Rotation Probe M11 Z Axis	[degree]	-0,000536	-0,000536	-0,000535	0,000000	0,000001

Figura 138. Δ rotazioni (flexible rotation probe) lungo X+

Confrontando questi valori ottenuti dalla FEA con i valori stabiliti nei requisiti previsti per la MSS i risultati che ne derivano sono in linea con le specifiche tecniche di MORFEO.

5.3.4 FEA – Distorsione indotta dalla NP

Come già presentato nel paragrafo 4.5.5 e sulla base dell'analisi statica, seguendo sempre le Specifiche Tecniche della struttura principale, per la MSS, viene eseguita l'Analisi della Distorsione Indotta dalla Nasmyth Platform al modulo MORFEO. L'Induced Distortion Analysis studia l'impatto delle distorsioni della piattaforma Nasmyth sulla MSS di MORFEO.

Applicando le condizioni al contorno definite nel paragrafo 4.5.5 e raffigurate nella figura seguente si può procedere all'analisi. Gli stessi input settati sono presentati sia in forma grafica che in forma tabellare di seguito (Figura 139 e Figura 140).

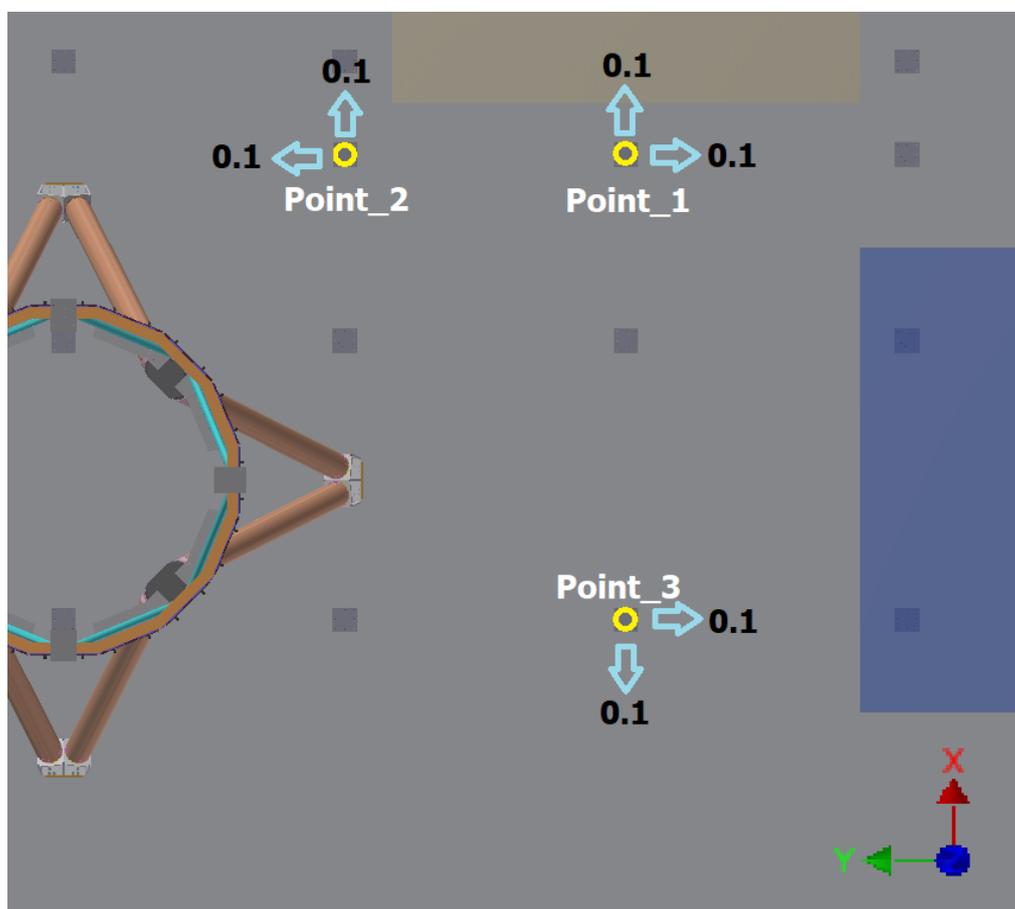


Figura 139. Spostamenti imposti sui punti di attacco in NP

Name	Units	IMPOSED		Δ
		DISPLACEMENTS + STATIC	STATIC	
Imposed Displacement Point_1 X Component	mm	0,1	0	IMPOSED DISPLACEMENTS + STATIC - STATIC = IMPOSED DISPLACEMENTS
Imposed Displacement Point_1 Y Component	mm	-0,1	0	
Imposed Displacement Point_1 Z Component	mm	0	0	
Imposed Displacement Point_2 X Component	mm	0,1	0	
Imposed Displacement Point_2 Y Component	mm	0,1	0	
Imposed Displacement Point_2 Z Component	mm	0	0	
Imposed Displacement Point_3 X Component	mm	-0,1	0	
Imposed Displacement Point_3 Y Component	mm	-0,1	0	
Imposed Displacement Point_3 Z Component	mm	0	0	

Figura 140. Condizioni al contorno per la Distortion analysis

Gli output per l'analisi della distorsione indotta dalla piattaforma Nasmyth, ovvero gli spostamenti e le rotazioni di ciascun elemento optomeccanico, sono mostrati nelle tabelle successive (Figura 141 e Figura 142).

Name	Units	IMPOSED		DELTA
		DISPLACEMENTS + STATIC	STATIC	
Deformation Probe SP X Axis	[mm]	-0,090852	-0,109760	0,018908
Deformation Probe SP Y Axis	[mm]	0,061196	-0,054616	0,115813
Deformation Probe SP Z Axis	[mm]	-0,300571	-0,277802	-0,022769
Deformation Probe M6 X Axis	[mm]	-0,037821	-0,072248	0,034427
Deformation Probe M6 Y Axis	[mm]	0,049180	-0,064412	0,113592
Deformation Probe M6 Z Axis	[mm]	-0,373988	-0,351505	-0,022484
Deformation Probe M7 X Axis	[mm]	0,009297	-0,016883	0,026180
Deformation Probe M7 Y Axis	[mm]	-0,005239	-0,001766	-0,003473
Deformation Probe M7 Z Axis	[mm]	-0,323558	-0,295315	-0,028244
Deformation Probe M8 X Axis	[mm]	-0,067795	-0,107176	0,039381
Deformation Probe M8 Y Axis	[mm]	0,171862	0,071930	0,099932
Deformation Probe M8 Z Axis	[mm]	-0,358723	-0,389307	0,030584
Deformation Probe M9/DM1 X Axis	[mm]	-0,136405	-0,145035	0,008630
Deformation Probe M9/DM1 Y Axis	[mm]	-0,035894	-0,077412	0,041519
Deformation Probe M9/DM1 Z Axis	[mm]	-0,445919	-0,422397	-0,023521
Deformation Probe M10/DM2 X Axis	[mm]	-0,095363	-0,112667	0,017304
Deformation Probe M10/DM2 Y Axis	[mm]	0,112870	0,072236	0,040634
Deformation Probe M10/DM2 Z Axis	[mm]	-0,390593	-0,424322	0,033729
Deformation Probe DC+FM1 X Axis	[mm]	-0,159879	-0,179103	0,019224
Deformation Probe DC+FM1 Y Axis	[mm]	0,012427	-0,033262	0,045689
Deformation Probe DC+FM1 Z Axis	[mm]	-0,238054	-0,212268	-0,025785
Deformation Probe M11 X Axis	[mm]	-0,046353	-0,082277	0,035924
Deformation Probe M11 Y Axis	[mm]	0,038255	0,013499	0,024756
Deformation Probe M11 Z Axis	[mm]	-0,340784	-0,272891	-0,067894

Figura 141. FEA spostamenti massimi CoG Optomech

Name	Units	IMPOSED		DELTA
		DISPLACEMENTS + STATIC	STATIC	
Flexible Rotation Probe SP X Axis	[degree]	-0,003583	-0,001327	-0,002256
Flexible Rotation Probe SP Y Axis	[degree]	0,002602	0,001843	0,000759
Flexible Rotation Probe SP Z Axis	[degree]	0,000690	0,000166	0,000524
Flexible Rotation Probe M6 X Axis	[degree]	-0,005143	-0,002736	-0,002406
Flexible Rotation Probe M6 Y Axis	[degree]	0,012882	0,012283	0,000599
Flexible Rotation Probe M6 Z Axis	[degree]	-0,000194	-0,000445	0,000252
Flexible Rotation Probe M7 X Axis	[degree]	-0,004373	-0,001893	-0,002480
Flexible Rotation Probe M7 Y Axis	[degree]	-0,006492	-0,006226	-0,000266
Flexible Rotation Probe M7 Z Axis	[degree]	-0,001812	-0,001782	-0,000029
Flexible Rotation Probe M8 X Axis	[degree]	-0,003129	-0,001261	-0,001868
Flexible Rotation Probe M8 Y Axis	[degree]	0,019049	0,018609	0,000440
Flexible Rotation Probe M8 Z Axis	[degree]	-0,001534	-0,001916	0,000382
Flexible Rotation Probe M9/DM1 X Axis	[degree]	-0,002936	-0,000825	-0,002111
Flexible Rotation Probe M9/DM1 Y Axis	[degree]	-0,018923	-0,018836	-0,000087
Flexible Rotation Probe M9/DM1 Z Axis	[degree]	-0,000046	-0,000246	0,000200
Flexible Rotation Probe M10/DM2 X Axis	[degree]	-0,002844	-0,000942	-0,001902
Flexible Rotation Probe M10/DM2 Y Axis	[degree]	0,020791	0,019791	0,001000
Flexible Rotation Probe M10/DM2 Z Axis	[degree]	0,000321	-0,000072	0,000393
Flexible Rotation Probe DC+FM1 X Axis	[degree]	-0,001478	0,000922	-0,002400
Flexible Rotation Probe DC+FM1 Y Axis	[degree]	-0,008030	-0,007822	-0,000208
Flexible Rotation Probe DC+FM1 Z Axis	[degree]	-0,000451	-0,000606	0,000155
Flexible Rotation Probe M11 X Axis	[degree]	-0,001572	0,001018	-0,002591
Flexible Rotation Probe M11 Y Axis	[degree]	0,007332	0,001462	0,005870
Flexible Rotation Probe M11 Z Axis	[degree]	-0,000096	-0,000536	0,000440

Figura 142. FEA rotazioni massime CoG Optomech

Confrontando i risultati ottenuti dalla FEA con i valori dei requisiti previsti per la MSS, i risultati che ne derivano sono in linea con le specifiche tecniche di MORFEO.

5.3.5 FEA – Stabilità in condizioni operazionali

Al fine di valutare la stabilità in condizioni operazionali della MSS di MORFEO, come richiesto dalle specifiche tecniche del SE, i contributi dell'analisi della distorsione indotta da Nasmyth e dell'analisi del vento (in condizioni operational) sono stati sommati lungo X+ e Y+ separatamente (Figure 143 e 144 di seguito).



	INDUCED DISPLACEMENT+ Δ OPERATIONAL WIND (X+)	INDUCED DISPLACEMENT+ Δ OPERATIONAL WIND (Y+)
Deformation Probe SP X Axis	0,019101769	0,018509082
Deformation Probe SP Y Axis	0,115710247	0,117286522
Deformation Probe SP Z Axis	-0,022807181	-0,02254802
Deformation Probe M6 X Axis	0,034632351	0,033759218
Deformation Probe M6 Y Axis	0,113468219	0,115717597
Deformation Probe M6 Z Axis	-0,022460669	-0,022060305
Deformation Probe M7 X Axis	0,026260358	0,026003321
Deformation Probe M7 Y Axis	-0,003495478	-0,003232966
Deformation Probe M7 Z Axis	-0,028258115	-0,028117001
Deformation Probe M8 X Axis	0,039611466	0,039010167
Deformation Probe M8 Y Axis	0,09977185	0,101987101
Deformation Probe M8 Z Axis	0,030648381	0,030483782
Deformation Probe M9/DM1 X Axis	0,008764654	0,008353099
Deformation Probe M9/DM1 Y Axis	0,041463688	0,042356208
Deformation Probe M9/DM1 Z Axis	-0,02354598	-0,023325264
Deformation Probe M10/DM2 X Axis	0,017472439	0,017040573
Deformation Probe M10/DM2 Y Axis	0,040510856	0,04199034
Deformation Probe M10/DM2 Z Axis	0,033809125	0,033635795
Deformation Probe DC+FM1 X Axis	0,019314274	0,019003749
Deformation Probe DC+FM1 Y Axis	0,045648692	0,046081772
Deformation Probe DC+FM1 Z Axis	-0,025800213	-0,025649875
Deformation Probe M11 X Axis	0,036056396	0,035650488
Deformation Probe M11 Y Axis	0,024650667	0,025730078
Deformation Probe M11 Z Axis	-0,067812324	-0,068263918
Deformation Probe SP X Axis	-0,002254421	-0,002275237
Deformation Probe SP Y Axis	0,000760937	0,000756934
Deformation Probe SP Z Axis	0,000523071	0,000528634
Deformation Probe M6 X Axis	-0,002404916	-0,002415795
Deformation Probe M6 Y Axis	0,000601004	0,000612715
Deformation Probe M6 Z Axis	0,000251547	0,000242292
Deformation Probe M7 X Axis	-0,002479568	-0,002485704
Deformation Probe M7 Y Axis	-0,000265841	-0,000265501
Deformation Probe M7 Z Axis	-2,941E-05	-2,88149E-05
Deformation Probe M8 X Axis	-0,001866929	-0,001885174
Deformation Probe M8 Y Axis	0,000445805	0,000435556
Deformation Probe M8 Z Axis	0,000382072	0,000382223
Deformation Probe M9/DM1 X Axis	-0,002110273	-0,002124838
Deformation Probe M9/DM1 Y Axis	-8,56992E-05	-9,01332E-05
Deformation Probe M9/DM1 Z Axis	0,000199099	0,000203027
Deformation Probe M10/DM2 X Axis	-0,001900749	-0,001921111
Deformation Probe M10/DM2 Y Axis	0,001004131	0,000994613
Deformation Probe M10/DM2 Z Axis	0,000393265	0,000392393
Deformation Probe DC+FM1 X Axis	-0,002399256	-0,002407717
Deformation Probe DC+FM1 Y Axis	-0,000207826	-0,0002098
Deformation Probe DC+FM1 Z Axis	0,000155291	0,000152247
Deformation Probe M11 X Axis	-0,002588674	-0,0026018
Deformation Probe M11 Y Axis	0,005870392	0,005855466
Deformation Probe M11 Z Axis	0,000440122	0,000434298
	MAX	MAX
	0,115710247	0,117286522

Figura 143. FEA Risultati in condizioni operazionali: spostamenti



	INDUCED DISPLACEMENT+ Δ OPERATIONAL WIND (X+)	INDUCED DISPLACEMENT+ Δ OPERATIONAL WIND (Y+)
Flexible Rotation Probe SP X Axis	-0,002254421	-0,002275237
Flexible Rotation Probe SP Y Axis	0,000760937	0,000756934
Flexible Rotation Probe SP Z Axis	0,000523071	0,000528634
Flexible Rotation Probe M6 X Axis	-0,002404916	-0,002415795
Flexible Rotation Probe M6 Y Axis	0,000601004	0,000612715
Flexible Rotation Probe M6 Z Axis	0,000251547	0,000242292
Flexible Rotation Probe M7 X Axis	-0,002479568	-0,002485704
Flexible Rotation Probe M7 Y Axis	-0,000265841	-0,000265501
Flexible Rotation Probe M7 Z Axis	-2,941E-05	-2,88149E-05
Flexible Rotation Probe M8 X Axis	-0,001866929	-0,001885174
Flexible Rotation Probe M8 Y Axis	0,000445805	0,000435556
Flexible Rotation Probe M8 Z Axis	0,000382072	0,000382223
Flexible Rotation Probe M9/DM1 X Axis	-0,002110273	-0,002124838
Flexible Rotation Probe M9/DM1 Y Axis	-8,56992E-05	-9,01332E-05
Flexible Rotation Probe M9/DM1 Z Axis	0,000199099	0,000203027
Flexible Rotation Probe M10/DM2 X Axis	-0,001900749	-0,001921111
Flexible Rotation Probe M10/DM2 Y Axis	0,001004131	0,000994613
Flexible Rotation Probe M10/DM2 Z Axis	0,000393265	0,000392393
Flexible Rotation Probe DC+FM1 X Axis	-0,002399256	-0,002407717
Flexible Rotation Probe DC+FM1 Y Axis	-0,000207826	-0,0002098
Flexible Rotation Probe DC+FM1 Z Axis	0,000155291	0,000152247
Flexible Rotation Probe M11 X Axis	-0,002588674	-0,0026018
Flexible Rotation Probe M11 Y Axis	0,005870392	0,005855466
Flexible Rotation Probe M11 Z Axis	0,000440122	0,000434298
Flexible Rotation Probe SP X Axis	-0,002254421	-0,002275237
Flexible Rotation Probe SP Y Axis	0,000760937	0,000756934
Flexible Rotation Probe SP Z Axis	0,000523071	0,000528634
Flexible Rotation Probe M6 X Axis	-0,002404916	-0,002415795
Flexible Rotation Probe M6 Y Axis	0,000601004	0,000612715
Flexible Rotation Probe M6 Z Axis	0,000251547	0,000242292
Flexible Rotation Probe M7 X Axis	-0,002479568	-0,002485704
Flexible Rotation Probe M7 Y Axis	-0,000265841	-0,000265501
Flexible Rotation Probe M7 Z Axis	-2,941E-05	-2,88149E-05
Flexible Rotation Probe M8 X Axis	-0,001866929	-0,001885174
Flexible Rotation Probe M8 Y Axis	0,000445805	0,000435556
Flexible Rotation Probe M8 Z Axis	0,000382072	0,000382223
Flexible Rotation Probe M9/DM1 X Axis	-0,002110273	-0,002124838
Flexible Rotation Probe M9/DM1 Y Axis	-8,56992E-05	-9,01332E-05
Flexible Rotation Probe M9/DM1 Z Axis	0,000199099	0,000203027
Flexible Rotation Probe M10/DM2 X Axis	-0,001900749	-0,001921111
Flexible Rotation Probe M10/DM2 Y Axis	0,001004131	0,000994613
Flexible Rotation Probe M10/DM2 Z Axis	0,000393265	0,000392393
Flexible Rotation Probe DC+FM1 X Axis	-0,002399256	-0,002407717
Flexible Rotation Probe DC+FM1 Y Axis	-0,000207826	-0,0002098
Flexible Rotation Probe DC+FM1 Z Axis	0,000155291	0,000152247
Flexible Rotation Probe M11 X Axis	-0,002588674	-0,0026018
Flexible Rotation Probe M11 Y Axis	0,005870392	0,005855466
Flexible Rotation Probe M11 Z Axis	0,000440122	0,000434298
	MAX	MAX
	0,005870392	0,005855466

Figura 144. FEA Risultati in condizioni operazionali: rotazioni

Confrontando i risultati ottenuti dalla FEA con i valori dei requisiti tecnici previsti per MORFEO, la MSS non deve indurre alle optomeccaniche (suo payload) spostamenti e rotazioni superiori a:

- $T_x, T_y, T_z = 0.2 \text{ mm}$
- $R_y, R_z = 0.0013^\circ$ e $R_x = 0.016^\circ$

I risultati delle analisi FEA, in condizioni operative, per gli spostamenti delle Optomech risultano in linea con le specifiche tecniche di MORFEO. Per quanto riguarda la rotazione lungo l'asse Y di M11 il requisito sembra non essere rispettato ma, considerando che M11 è l'unico elemento optomeccanico non vincolato da elementi rigidi, il risultato non sta considerando la rigidità dell'elemento optomeccanico stesso. Infatti, il carico di M11 viene simulato con due masse concentrate da 175 kg applicate sui punti di attacco del supporto direttamente sulla MSS (vedi paragrafo 5.2.3). Questo ultimo approccio è stata una chiara scelta progettuale (ipotesi molto conservativa) per non indurre rigidità aggiuntiva durante la fase di dimensionamento della MSS. Non va trascurato, infatti, che M11 è posto in una zona “aperta” della MSS che risulta sprovvista di elementi strutturali atti a veicolare parte del carico agente. Nel design precedente (Figura 145 a destra) erano presenti gli MPC184 che contribuivano, impropriamente, a migliorare la rigidità locale della MSS. Nella prossima fase di design saranno implementati elementi “ad-hoc” con una rigidità equivalente e non “infinita”, pari al contributo della sola Optomech M11.

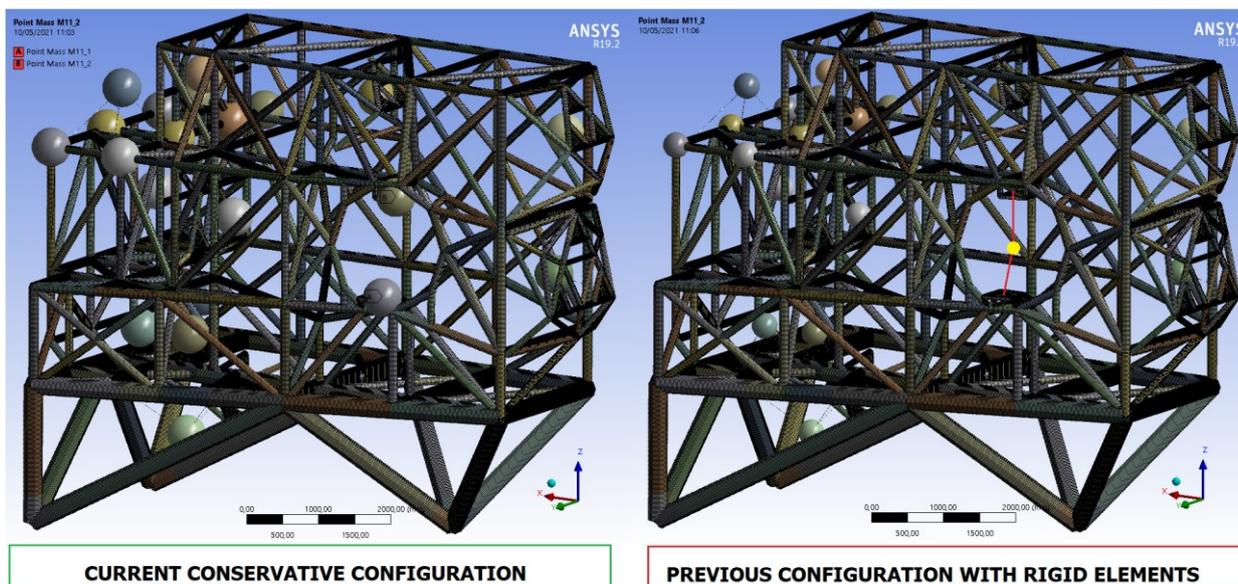


Figura 145. Confronto tra M11 nel modello FE attuale e nella precedente versione meno conservativa

5.3.6 FEA - Analisi di Buckling

Sulla base della rapida descrizione fornita nel paragrafo 4.5.3, è stata eseguita per la MSS anche l'analisi di instabilità. Questa analisi viene impostata utilizzando le accelerazioni derivanti dal Load Case n°13, che risulta essere il caso peggiore per le analisi sismiche della MSS. Si ottiene che il moltiplicatore di carico minimo per l'analisi di instabilità è **24.354** come mostrato in Figura 146. Dai plot anche degli altri modi (Figura 147) si può notare che gli elementi di forma sottile, alcune beam, sono più soggette ad instabilità. In particolare, per il primo ed il secondo modo di instabilità è interessata sempre la stessa trave evidenziata all'ultimo livello della MSS, mentre per il terzo e quarto una trave posta al primo livello della MSS. Non è un caso che gli elementi soggetti ad instabilità sono, per i primi 4 modi, sempre delle diagonali. Questi elementi, infatti, hanno spessori ridotti rispetto agli elementi verticali adiacenti per ottimizzare la massa complessiva della MSS. Notando tale comportamento saranno presi dei correttivi locali che andranno a mitigare tale tendenza ed aiuteranno una più efficiente distribuzione dei carichi.

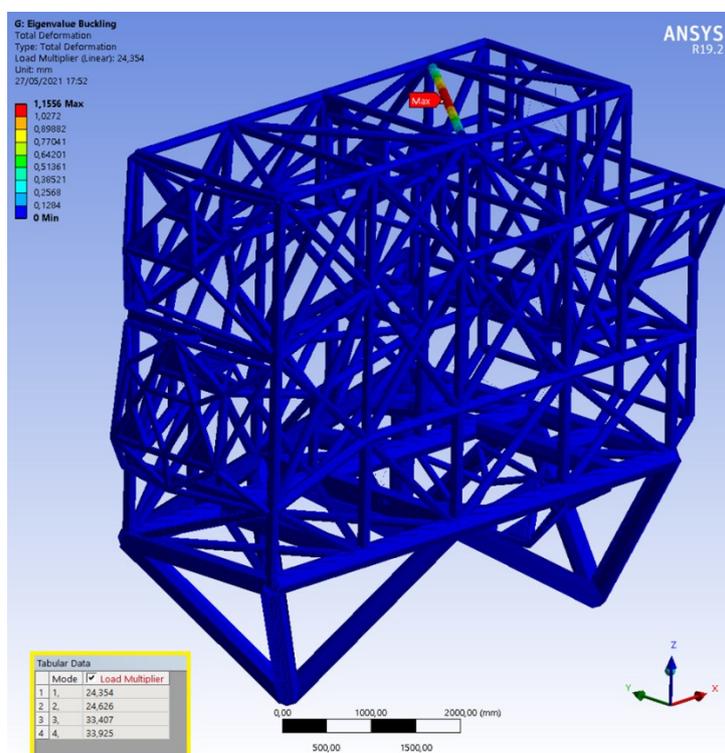


Figura 146. Analisi di Buckling MSS: 1° modo e valori tabellari

Con l'obiettivo di dare una visione più completa del comportamento della struttura, le immagini successive riportano le altre 3 modalità estratte per l'analisi di instabilità MSS.

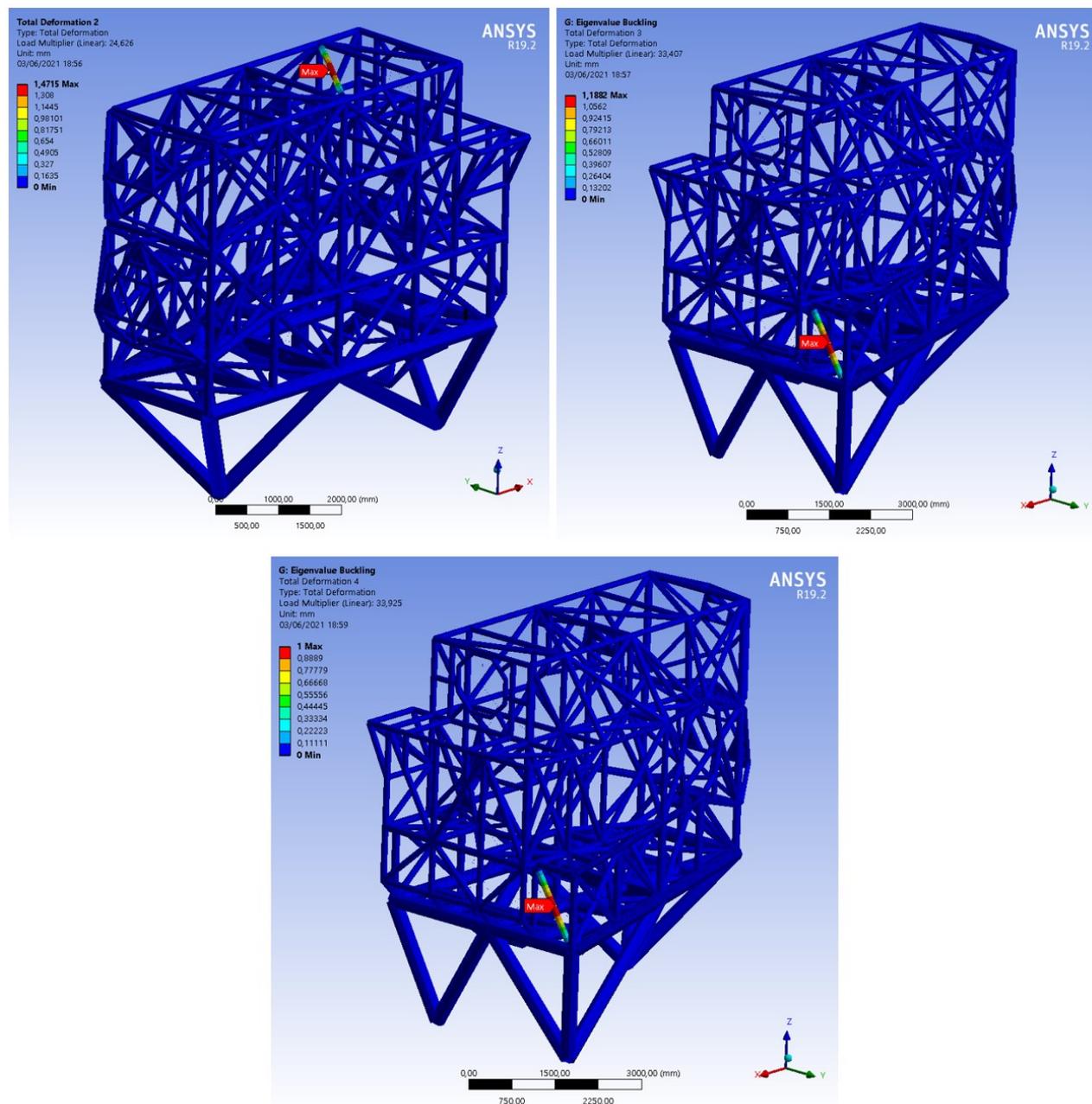


Figura 147. Analisi di Buckling MSS: 2° e 3° modo (in alto) 4° modo (in basso)

6. SUBMODELING FEA PER LA MSS

In questo paragrafo, dedicato alla tecnica di **submodeling FEA**, descriveremo ed analizzeremo nel dettaglio a livello locale le flange di interfaccia della MSS sulla piattaforma Nasmyth nonché alcuni giunti che collegano le parti principali della MSS, come precedentemente dichiarato nel paragrafo 4.4.

Nel modello FE globale della MSS, gli elementi strutturali sono modellati come BEAM188 (1D) e come elementi SHELL181 (2D). Questo tipo di discretizzazione è molto indicata per analisi a livello globale che vadano a stimare, conservativamente, il comportamento di una struttura. Casi specifici come il collegamento sulla Nasmyth Platform o delle sezioni a forte variazione di geometria tra modello FE semplificato e modello CAD 3D, devono essere attenzionati con analisi aggiuntive al fine di non perdere informazioni importanti, a livello locale, sul dimensionamento della struttura in esame. In questo tipo di analisi si utilizzano dei modelli CAD più spinti mentre dai FE di partenza si estraggono tutte le condizioni al contorno per settare l'analisi.

I sotto-modelli degli item presi in esame sono stati esportati dal software CAD 3D (Autodesk Inventor) ed importati, per la FEA, nel software **CAE Ansys WB 2020 R1**.

6.1 MSS Flange di interfaccia sulla NP - FEM

Il modello 3D di ogni nodo di interfaccia tra la MSS di MORFEO e la Piattaforma Nasmyth è stato analizzato, separatamente, con una FEA dedicata. Nella figura seguente (Figura 148) viene mostrato come esempio il primo nodo di interfaccia con la NP. In questo paragrafo sarà descritto il modello FE del primo nodo di interfaccia e, siccome l'approccio è condiviso con gli altri 2, si eviterà di ripetere la stessa descrizione anche per gli altri. I risultati, invece, saranno mostrati per tutti e tre i nodi di interfaccia tra MSS e NP. È importante analizzare tutti i nodi nello specifico perché nonostante il modo di procedere sia simile da un punto di vista dell'analisi, un item potrebbe

risultare più sollecitato di un altro. Il nodo di interfaccia al Punto_1 è proprio il più sollecitato, quindi rappresenta un ottimo case study per questa trattazione. Grazie a questo esempio infatti, ci aspettiamo di definire, ad esempio, il materiale da usare, il SF sugli stress nonché verificare la compliance ai requisiti di progetto.

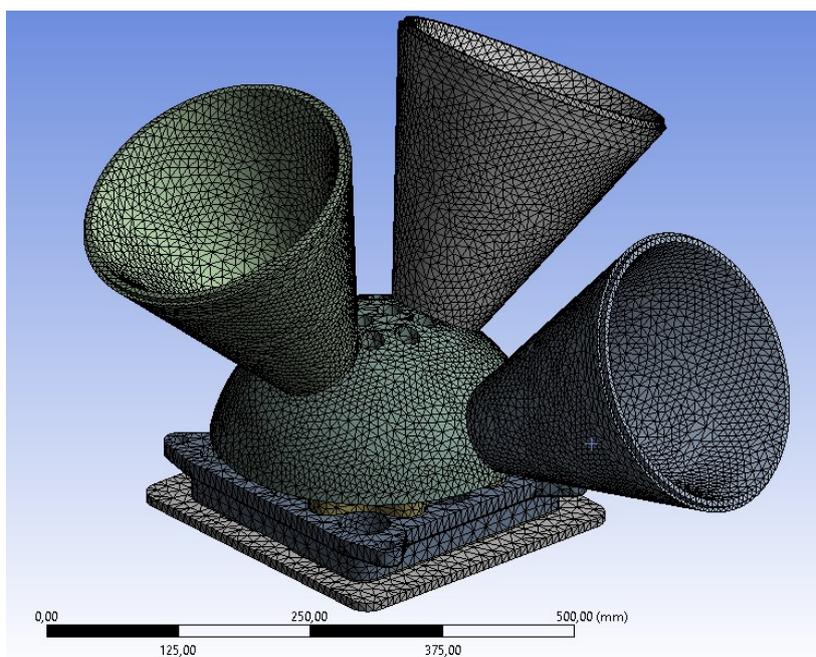


Figura 148. Dettaglio mesh del nodo di interfaccia al Punto_1

Come spiegato anche in precedenza, la Main Support Structure è vincolata sulla Nasmyth Platform tramite tre nodi di interfaccia. La connessione all'interfaccia è costituita da snodi sferici che per la loro geometria mitigano il trasferimento dei momenti sulla NP. Le forze e i momenti, passano per questa interfaccia e poi vengono trasferiti al punto di supporto fisso sulla NP. Nel modello FE della struttura principale stati modellati tre giunti sferici, simulando i nodi reali.

La scelta di posizionare gli snodi sferici a quota **62 mm** in direzione Z è veicolata alla risoluzione di uno specifico problema progettuale sulle forze e sui momenti di interfaccia alla NP. La sfera è dimensionata strutturalmente per avere una superficie di contatto sufficiente sia all'ideale trasferimento dei carichi che alla regolazione della MSS. Il raggio esterno massimo della sfera è di 65 mm (vedi Figura 149 sotto).

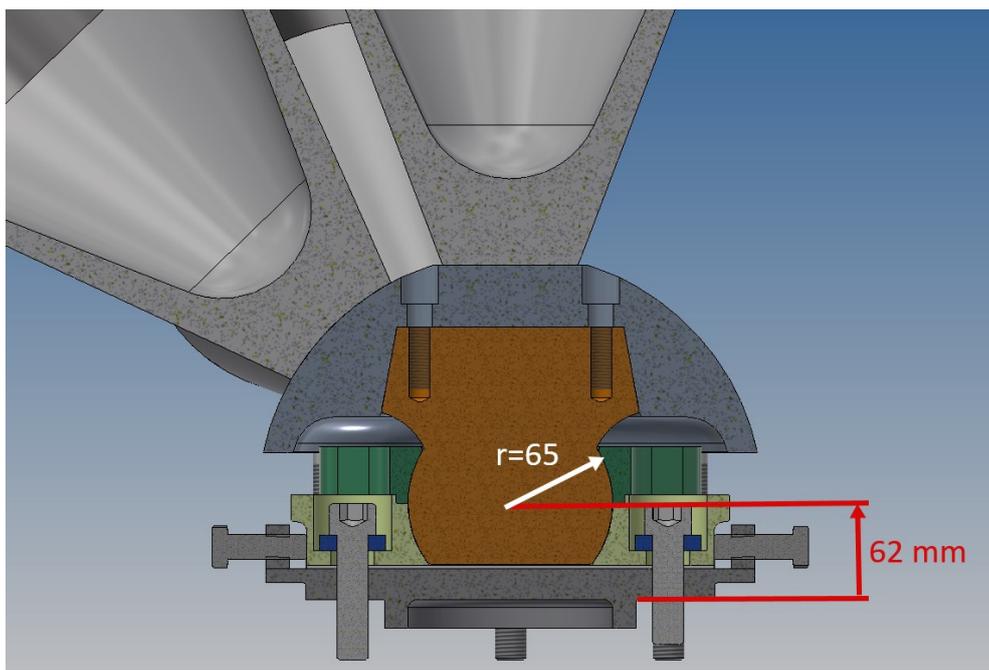


Figura 149. Nudo di interfaccia al Punto_1 – vista in sezione con dimensioni

Nella figura sottostante sono mostrati e numerati i tre nodi di interfaccia tra la MSS di MORFEO e la Nasmyth Platform. Per le coordinate dei punti MAIN usati e per il dettaglio geometrico dell'interfaccia fare riferimento al capitolo 4.

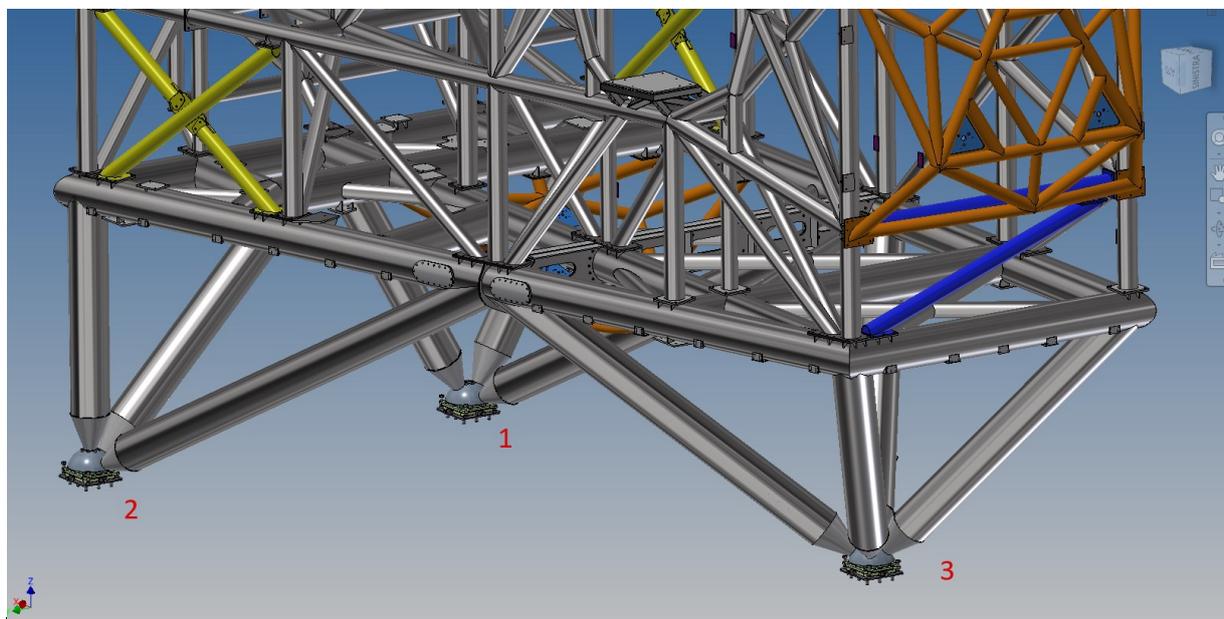


Figura 150. Nodi di interfaccia sulla NP: Punto_1, Punto_2 e Punto_3

6.1.1 Caratteristiche dei materiali utilizzati

Per garantire agli item in esame le corrette performance meccaniche sono stati impiegati diversi materiali a seconda delle sollecitazioni in gioco. Le loro caratteristiche sono descritte nel paragrafo 5.2.2 di questa tesi. I materiali prescelti per questa applicazione sono:

- **Acciaio WELDOX700**, per la semisfera delle flange di interfaccia della MSS sulla NP;
- **Acciaio 40NiCrMo7**, per la sfera delle flange di interfaccia della MSS sulla NP.

La scelta dei materiali dipende dai feedback ottenuti dalla FEA. Il design di queste interfacce, infatti, è fortemente orientato alle massime prestazioni ed al mantenimento delle condizioni di funzionamento operativo. Si deve garantire una resistenza pari alla vita utile dello strumento.

6.1.2 Vincoli e carichi del modello FEM

L'immagine seguente deriva dal modello FE globale della MSS (presentato nel capitolo 5) ed evidenzia il nodo di interfaccia al Punto_1 sulla NP, oltreché mostrare i sistemi di coordinate locali di riferimento, utili per definire le condizioni al contorno da importare per le verifiche locali. In questo modello globale della MSS, all'interfaccia, tra gamba ed elemento conico sono posizionati tre "joint fissi" sui tre nodi corrispondenti. In questo modo si possono desumere le condizioni al contorno dal modello globale per importarle nel modello locale o sottomodello FEM 3D del giunto.

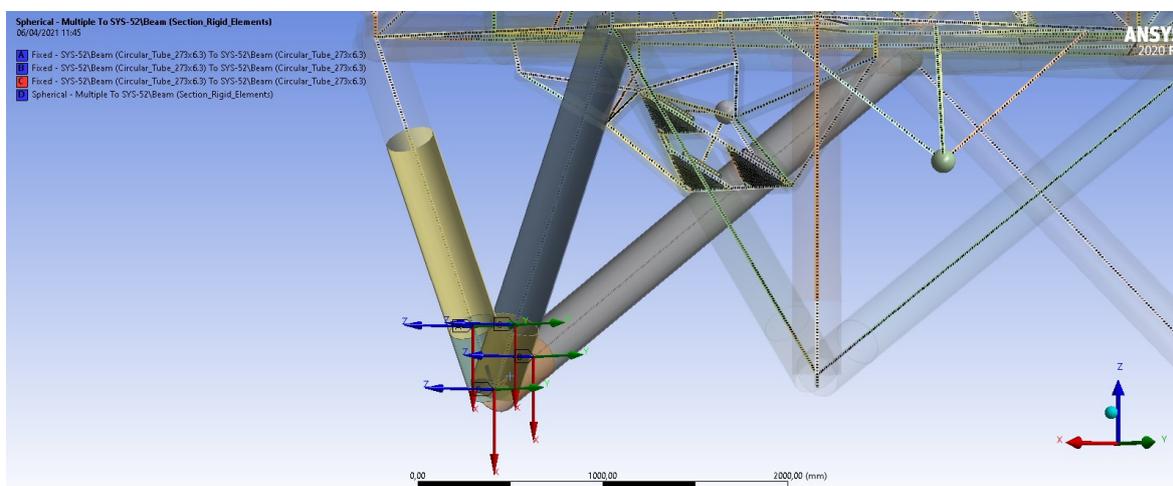


Figura 151. Sistemi di coordinate locali del sottomodello

In questo modo, nel sottomodello ci è consentito di valutare il comportamento delle flange di interfaccia con la NP sotto l'azione della MSS, importando direttamente le condizioni al contorno dal modello FE globale della MSS tramite i *fixed joint* giunti precedentemente mostrati (Figura 151). Quindi, in sostanza, è possibile imporre al sottomodello locale 3D le azioni esterne (viste come condizioni di carico) lette dal modello globale all'interfaccia da noi definita. Queste azioni esterne sono dei contributi esplicitati in forze e momenti che applicati direttamente nel sottomodello dello snodo sferico dal FEM generale della MSS. Le forze ed i momenti letti dal modello principale sono esplicitati nel sistema di coordinate del giunto, quindi necessitano di una trasformazione delle coordinate per essere applicati nel sottomodello. Le forze nel sistema di coordinate globali C-SYS MORFEO sono riportate nella tabella di seguito.

ID of joint	F_x [kN]	F_y [kN]	F_z [kN]	M_x [kNmm]	M_y [kNmm]	M_z [kNmm]
Joint 1.1	23700	71,420	-13700	295000	-690000	68100
Joint 1.2	6,149	14300	-26500	207000	99900	51600
Joint 1.3	7,5447	-22600	-41200	-692000	265000	-233000

Figura 152. Forze e momenti applicati al Punto_1

I contributi della tabella precedente sono riferiti al caso di carico corrispondente ad una condizione sismica in cui il campo di accelerazione è definito secondo la Figura 153.

X-direction [mm/s ²]	Y-direction [mm/s ²]	Z-direction [mm/s ²]
-9708,5	32361,8	16229,9

Figura 153. Accelerazioni di terremoto applicate al Punto_1

Questi risultati numerici rappresentano la condizione di carico più severa per la struttura in esame. Ovviamente si tratta di un load case sismico ed essendo in condizioni survival, questa simulazione FE, viene eseguita solo per questo load case. Il grafico completo delle accelerazioni settabili è fornito nel paragrafo sull'Earthquake analysis. La condizione in esame è considerata il **worst case**

ingegneristico, poiché in questo campo di accelerazione anche a risultante delle forze di reazione nel nodo è massima. Le forze e i momenti, gli elementi rossi in Figura 154, sono applicati alla superficie superiore dei coni mentre la zona evidenziata in blu scuro nell'immagine mostra come il sottomodello del nodo Interfaccia alla piattaforma Nasmyth è bloccato in ogni direzione. L'area blu rappresenta la condizione al contorno del sottomodello. Il campo di forza viene importato dal modello globale della MSS di MORFEO direttamente nel sottomodello locale del giunto, operando un collegamento tra i due progetti nel work flow di Ansys WB.

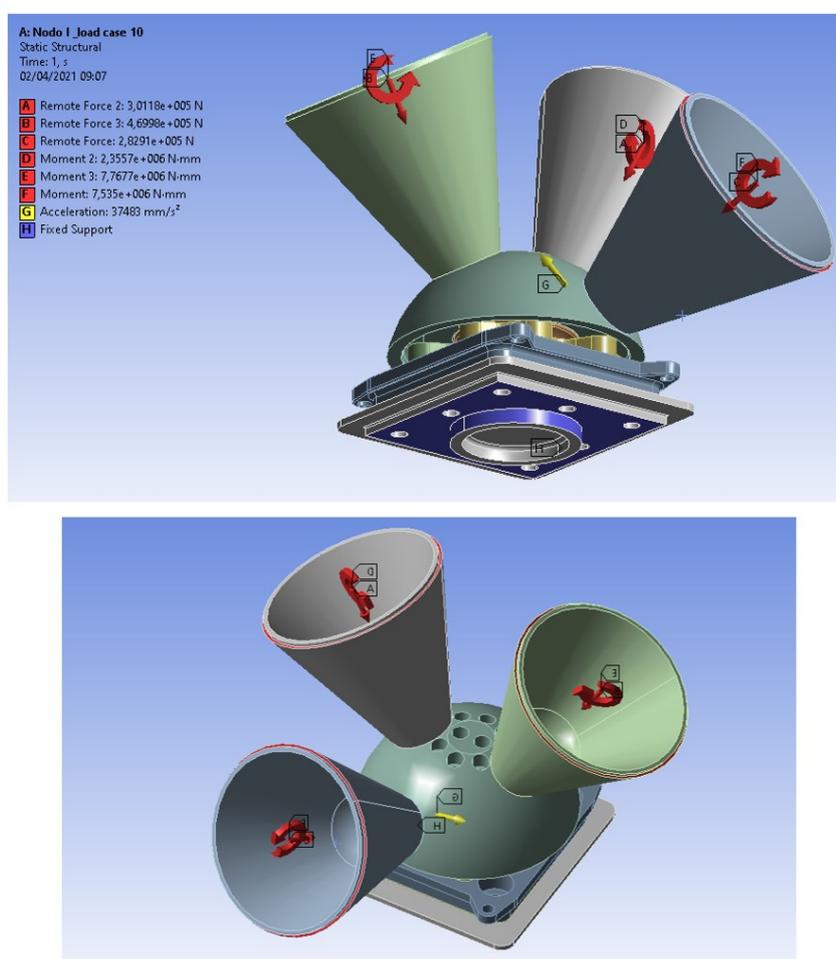


Figura 154. Vincoli e carichi applicati al sottomodello del Punto_1

In questo sottomodello FE, l'altro carico esterno agente è il campo di accelerazioni da terremoto mostrato prima. Il modello è discretizzato utilizzando elementi tetraedrici con 20 nodi (SOLID186) con una dimensione dell'elemento della mesh di **8 mm**.

6.1.3 Risultati FEA

I risultati statici in termini di massime sollecitazioni equivalenti di Von Mises sugli item sotto esame che compongono le flange di interfaccia della MSS sulla NP sono mostrati nella figura seguente (Figura 155). Un ulteriore panoramica sui cosiddetti oggetti “secondari”, come i bulloni di fissaggio, viene fornita alla fine del paragrafo.

Come si può vedere in Figura 155, il punto di maggiore sollecitazione si trova tra la base dell'elemento conico e la calotta emisferica posta sulle flange di interfaccia. Il valore massimo ottenuta dalla FEA è amplificato dal fatto che la saldatura non sia modellata nel modello CAD. Avere localmente del materiale di apporto, come quello di saldatura, andrebbe certamente a mitigare le concentrazioni di tensione nelle zone a forte curvatura come quelle in esame. Si è deciso di non apportare nessuna miglioria geometrica al modello in modo da verificare le condizioni di carico con un approccio più conservativo. Il valore massimo della sollecitazione equivalente di Von Mises è **434.5 MPa**. Il coefficiente di sicurezza da applicare per il design è di 1.1 mentre quello per il materiale è di 1.15 entrambi definiti dall'ESO Engineering Analysis Standard e riportati anche nel paragrafo 4.5.1.

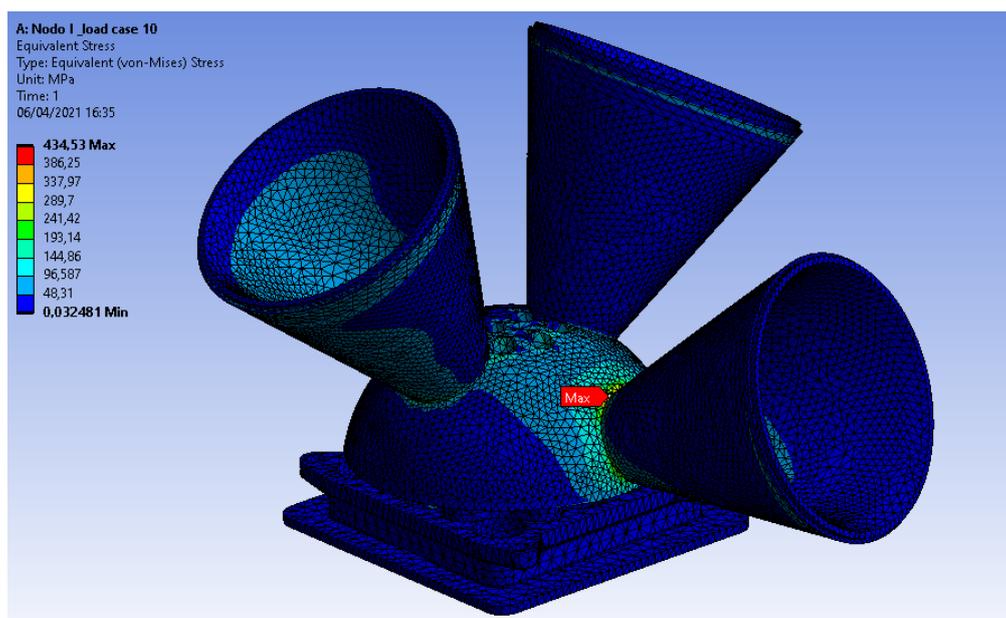


Figura 155. Stress equivalente di Von Mises del sottomodulo al Punto_1

Il **fattore di sicurezza (RF)** ottenuto è calcolato di seguito.

$$\sigma_{\text{yieldW700}} > \sigma_{\text{max}} \rightarrow 650 \text{ MPa} > 434.5 \text{ MPa} \rightarrow \mathbf{RF} = 650 / (434.5 * 1.1 * 1.15) = \mathbf{1.18} > \mathbf{1.0}$$

Per sostenere quell'alto valore della sollecitazione di snervamento, come già enunciato, è stata scelta come lega d'acciaio per il giunto conico il **WELDOX700** (snervamento minimo a 650 MPa per spessori di 100 mm), per il quale le caratteristiche sono riportate nei materiali paragrafo (5.2.2).

I risultati ottenuti sullo snodo sferico sono isolati nella figura successiva (Figura 156).

Il valore della sollecitazione massima equivalente di Von Mises, in questo caso, è **428.4 MPa**.

Come precedentemente illustrato, la RF è calcolata secondo il paragrafo 4.5.1.

$$\sigma_{\text{yield40NiCrMo7}} > \sigma_{\text{max}} \rightarrow 665 \text{ MPa} > 428.4 \text{ MPa} \rightarrow \mathbf{RF} = 665 / (428.4 * 1.1 * 1.15) = \mathbf{1.23} > \mathbf{1.0}$$

A causa delle limitazioni della lega di acciaio utilizzata per gli elementi conici, è stato scelto, per questa applicazione, un acciaio ancora più performante: il materiale dello snodo sferico è acciaio **40NiCrMo7** con un carico di snervamento massimo di 665 MPa. Per realizzare lo snodo sarà tornita una barra tonda da 160 mm al fine di ottenerne una sfera da 160 mm di diametro.

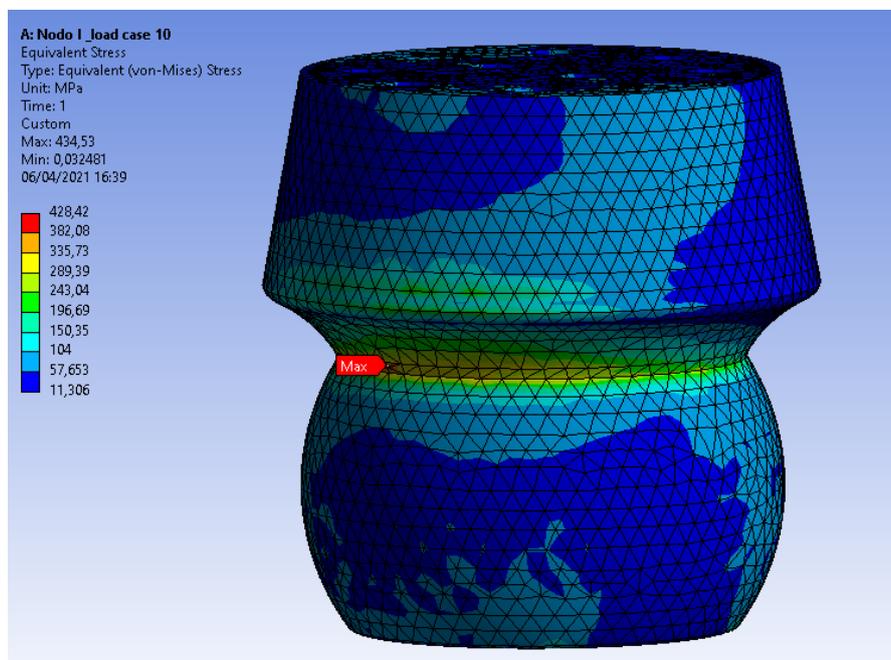


Figura 156. Stress equivalente di Von Mises sullo snodo sferico al Punto_1

La seguente tabella riepilogativa riporta i valori massimi di sollecitazione equivalente di von Mises per i casi analizzati per ciascuno dei tre nodi. Il rationale è quello di applicare sempre la peggiore accelerazione possibile al sottomodello, ovvero quella per la quale risulta massimo il valore della forza risultante agente su quel nodo di interfaccia.

	Acceleration x [mm/sec ²]	Acceleration y [mm/sec ²]	Acceleration z [mm/sec ²]	Max Von Mises Stress [MPa]
Node I	-9708,5	32362	16230	434,5
Node II	-9708,5	-32362	16230	439,2
Node III	32362	-9708,5	16230	398,8

Figura 156. Casi di carico peggiori per ciascuna flangia della MSS sulla NP

Un'altra verifica da effettuare è il calcolo della pressione di contatto dello snodo sferico. L'albero sferico deve essere strutturalmente in grado di trasmettere le forze in gioco all'interfaccia ESO sulla NP. Inoltre, la pressione sulla superficie di contatto tra l'albero sferico e gli elementi che lo accolgono deve essere inferiore ad un valore limite per consentire lo scorrimento delle due facce l'una sull'altra. Se la pressione supera il valore di 300 N/mm^2 , il cuscinetto sferico potrebbe non funzionare correttamente ed anche i momenti potrebbero essere trasferiti ai nodi di base dell'interfaccia. L'area di contatto dello snodo sferico (in trazione) è mostrata in Figura 157.

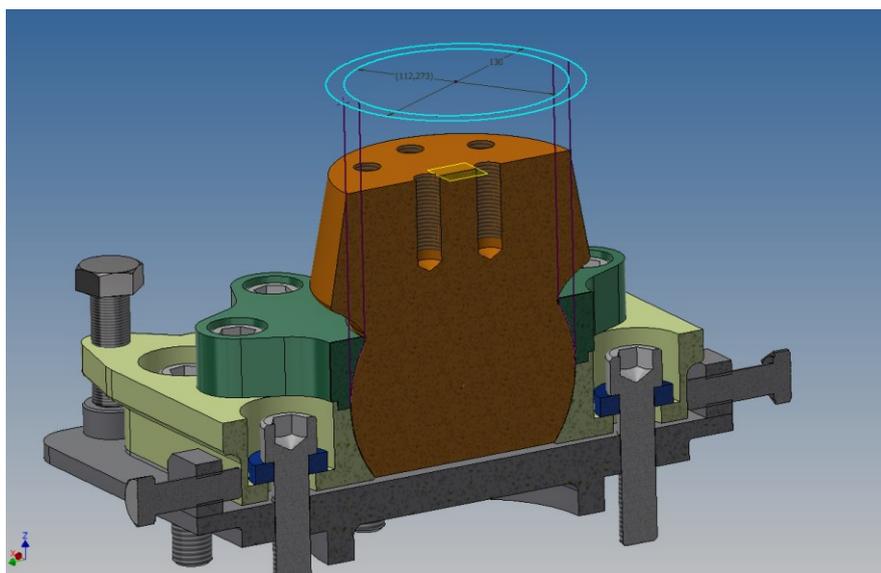


Figura 157. Vista in sezione dello snodo sferico al Punto_1 e superficie PS_{xy}

I materiali comunemente utilizzati per questo tipo di applicazione sono fibre di rinforzo in PTFE, che consentono un'elevata pressione di picco e buone proprietà lubrificanti. Nella figura precedente è mostrata anche la proiezione ortogonale della area di contatto dello snodo sferico sul piano superiore (interfaccia con gli elementi in verde).

Le forze massime che possono essere trasferite in direzione Z (secondo ESO) sono 1000 kN in trazione (+Z) e 1250 kN in compressione (-Z). Inoltre deve essere considerato un coefficiente di sicurezza pari a 1.3 (secondo specifica MORFEO), quindi le forze massime ammissibili che possono essere trasferite attraverso la superficie di contatto dello snodo sono:

$$F_{Z+MAX} = F_{Z+ allowable} / RF_{max} \rightarrow 1000/1.3 = \mathbf{769.2 \text{ kN}}$$

e

$$F_{Z-MAX} = F_{Z- allowable} / RF_{max} \rightarrow 1250/1.3 = \mathbf{961.5 \text{ kN}}$$

Sapendo che la superficie proiettata (definita "PS_{xy}") dello snodo sferico in direzione + Z (vedi Figura 157 sopra), è di **3374 mm²**, la pressione media si calcola come segue.

$$\mathbf{Medium\ pressure_z} = F_{Z+MAX} / PS_{xy} \rightarrow 769200/3374 = \mathbf{228 \text{ MPa}}$$

Lo stesso approccio è stato utilizzato per la superficie proiettata nella direzione X e Y. Grazie alla simmetria geometrica dello snodo, l'area di proiezione in direzione X o Y risulta essere uguale.

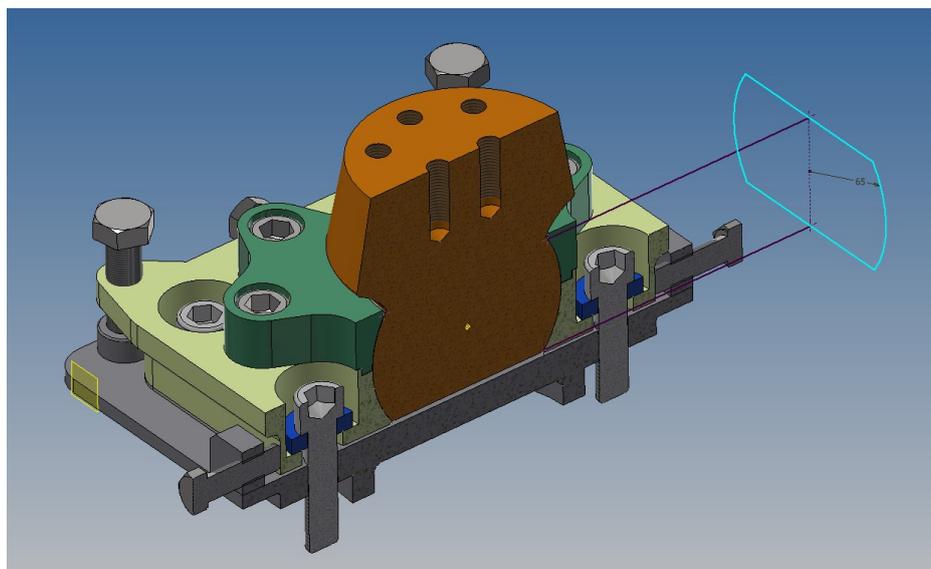


Figura 158. Vista in sezione dello snodo sferico al Punto_1 e superficie PS_{zx}

Il calcolo per la seconda area di contatto è riportato di seguito.

$$F_{(X,Y)MAX} = F_{(X,Y)allowable} / RF_{max} \rightarrow 500000/1.3 = \mathbf{384.6 \text{ kN}}$$

Sapendo che la superficie proiettata (definita "PS_{zx}") dello snodo sferico in direzione + Y (vedi Figura 158 sopra), è di **8741.7 mm²**, la pressione media viene calcolata come segue.

$$\mathbf{Medium \ pressure_{(X,Y)} = F_{(X,Y)MAX} / PS_{zx} \rightarrow 384600/8741.7 = 44 \text{ MPa}}$$

Avendo definito il limite di funzionamento dello snodo sferico a **300 MPa** possiamo affermare che questo item risulta compliance ai requisiti tecnici della MSS di MORFEO.

6.1.4 Collegamenti bullonati

Per installare le flange di interfaccia della MSS sulla piattaforma Nasmyth, vengono utilizzati 8 bulloni M20 (di grado 10.9). Sulla superficie inferiore delle flange di interfaccia è presente un sistema di centraggio atto a bloccare tutte le forze tangenziali. In questo modo i bulloni sono soggetti, di default, solo a forze assiali di trazione. Per la verifica dei bulloni sono state considerate le massime forze e momenti di reazione trasmessi da MORFEO alla NP.

La tabella con le forze ed i momenti di reazione alla NP viene fuori dal modello FE globale della MSS ed è riferita a tutti i 24 casi di carico del terremoto. La condizione di carico più gravosa per i bulloni delle flange di interfaccia, che garantiscono il collegamento tra NP e MSS, è quella presentata nella tabella di Figura 159.

Node ID	Point_1
x-Force reaction [N]	252201,06
y-Force reaction [N]	-15308,92
z-Force reaction [N]	-724367,19
x-Moment reaction [N*mm]	945357,62
y-Moment reaction [N*mm]	15635327,36
z-Moment reaction [N*mm]	0

Figura 159. Forze e momenti di reazione al Punto_1, load case 15

Queste forze e momenti di reazione sono riferite al load case 15 dell'analisi di terremoto sulla MSS che rappresenta il caso peggiore per il dimensionamento survival della struttura. Le accelerazioni settate sul modello globale per il load case 15 sono riportate di seguito.

X-direction [mm/s ²]	Y-direction [mm/s ²]	Z-direction [mm/s ²]
9708,5	-32361,8	3383,3

Figura 160. Accelerazioni load case 15

Dato che le forze di taglio X e Y sono trasferite alla piattaforma Nasmyth attraverso il blocchetto di centraggio, sono le forze di trazione assiale a caricare i bulloni. Le forze di reazione nella direzione Z del nodo interfaccia avendo segno negativo nel sistema di riferimento globale indicano che i bulloni sono caricati a trazione. La forza assiale su ciascun bullone è:

$$F_{ZBOLT} = F_{ZMAX} / N_{BOLT} \rightarrow 724367.19 / 8 = \mathbf{90546 \text{ N}}$$

Questo numero è positivo a causa della norma per cui un carico di trazione per un bullone è > 0 .

Ci sono anche i momenti in X e Y a caricare i bulloni. Dalla scienza delle costruzioni si assume che per il momento in direzione X i due bulloni posti sull'asse neutro (asse x) non reagiscano al momento esterno. Infatti una parte della piastra di interfaccia è compressa e l'altra parte è tesa a trazione, mentre i bulloni sull'asse neutro non sono interessati dal momento. Come si può vedere dalla figura a pagina seguente (Figura 161), la forza di trazione è fornita dai tre bulloni sulla linea esterna. Le forze assiali dovute al momento sono:

$$F_{ZBOLT_MX} = M_X / (d \times N_{BOLT_LOADED}) = 945357.6 / (200 \times 3) = \mathbf{1576 \text{ N (X direction)}}$$

$$F_{ZBOLT_MY} = M_Y / (d \times N_{BOLT_LOADED}) = 15635327.36 / (200 \times 3) = \mathbf{26059 \text{ N (Y direction)}}$$

dove **d** è la distanza arancione evidenziata nella figura successiva (vedi Figura 161).

I contributi calcolati per le forze assiali devono essere sommati e la forza sul singolo bullone è:

$$F_{ZTOT} = F_{ZBOLT} + F_{ZBOLT_MX} + F_{ZBOLT_MY} = \mathbf{118181 \text{ N}}$$

L'area resistente per i bulloni M20 è di 245 mm^2 (A_{sect}). Pertanto, la sollecitazione normale massima lungo l'asse Z (considerando la somma di tutti i contributi calcolati in precedenza) viene calcolata come:

$$\sigma_{\text{axial}} = F_{Z\text{TOT}} / A_{\text{sect}} = 118181 / 245 = 483 \text{ MPa}$$

sapendo che il carico di snervamento dei bulloni M20 di grado 10.9 è di 900 MPa.

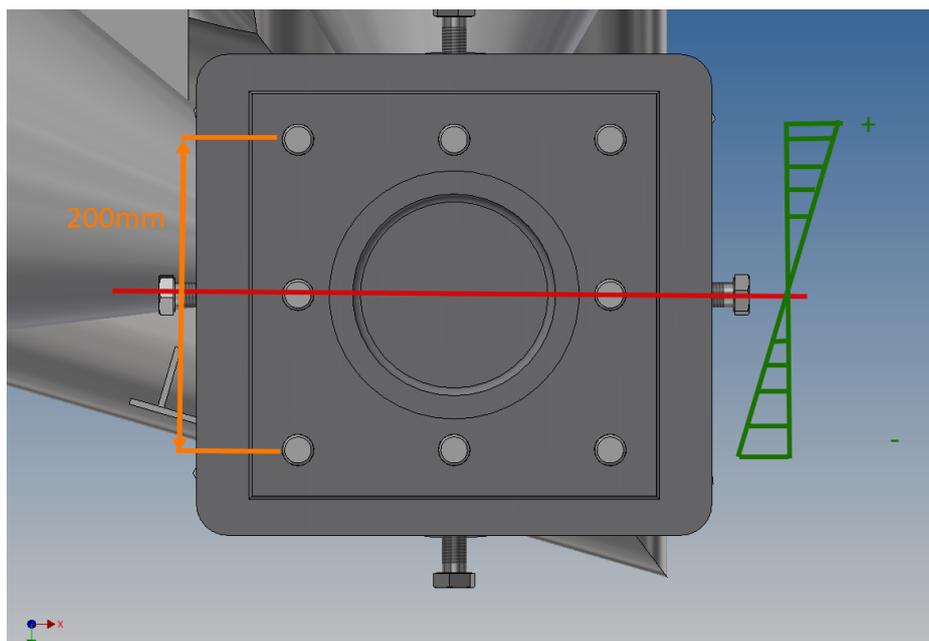


Figura 161. Momento applicato sui bulloni di interfaccia

6.2 Giunto centrale della MSS – FEM

La seconda parte delle analisi FEA per la sotto modellazione è incentrata sulla validazione strutturale dei giunti a forte variazione geometrica tra CAD 3D e modello FE semplificato 1D/2D. I giunti bullonati della MSS di MORFEO che uniscono più parti main della struttura possono essere un ottimo case study da prendere in considerazione. Gli oggetti su cui focalizzeremo la nostra attenzione sono due sezioni specifiche della MSS:

- Il **giunto centrale** tra le strutture della MSS “A1” ed “A2”.
- Il **giunto per Optomech** posto tra MSS, M8 e M10 (analizzato nel capitolo 6.3).

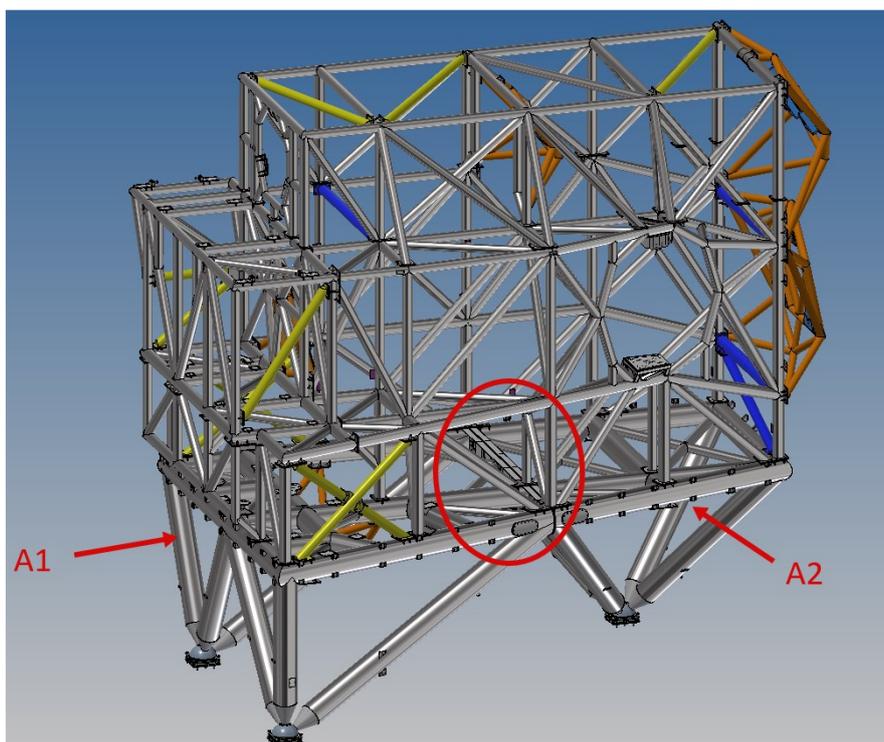


Figura 162. Giunto centrale MSS evidenziato (cerchio rosso)

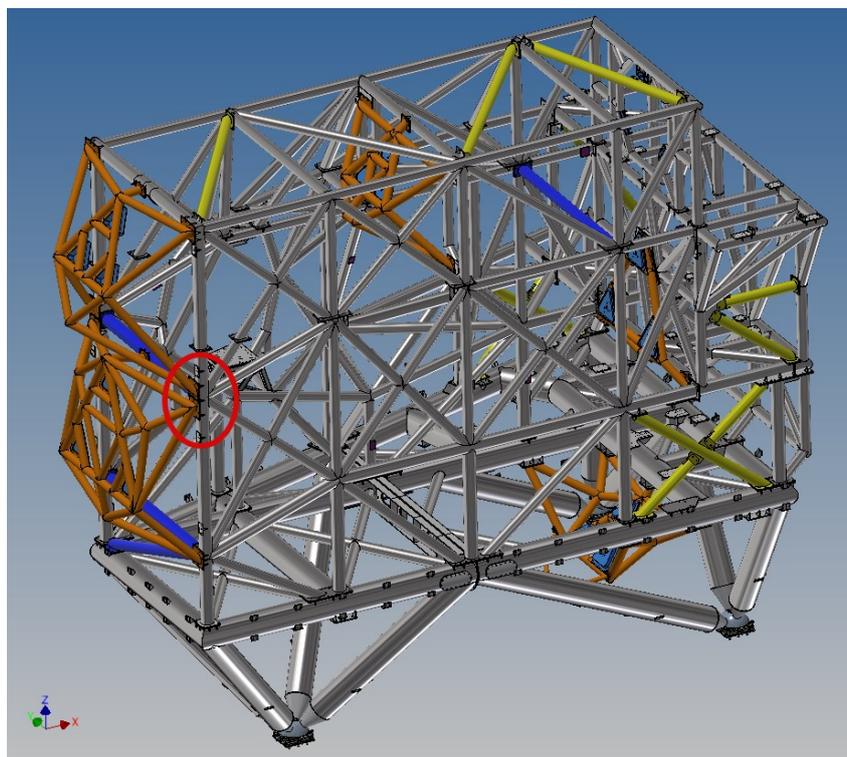


Figura 163. Giunto per Optomech evidenziato (cerchio rosso)

Per la verifica del giunto centrale è stata presa in considerazione una parte molto ampia della Struttura Principale di MORFEO in quanto la geometria locale del sottomodello è veramente molto

complessa e poco regolare in quella zona. La sezione investigata è evidenziata in giallo nella figura sottostante (vedi Figura 164). Poiché lo spessore degli elementi tubolari è molto piccolo rispetto alle altre 2 dimensioni, gli effetti nello spessore possono essere ritenuti “trascurabili”. Per tale ragione è stato scelto un sotto-modello per superfici per l'analisi strutturale locale.

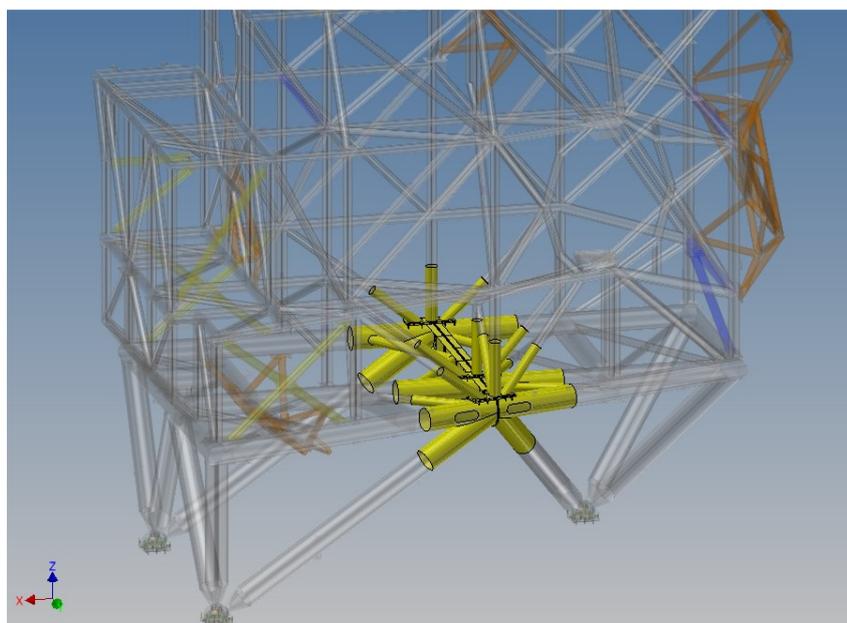


Figura 164. Modello CAD giunto centrale nella MSS

Il modello CAD 2D utile alla FEA derivato direttamente dal modello CAD 3D della MSS, con tutti i suoi particolari, è mostrato nella figura sottostante (Figura 165).

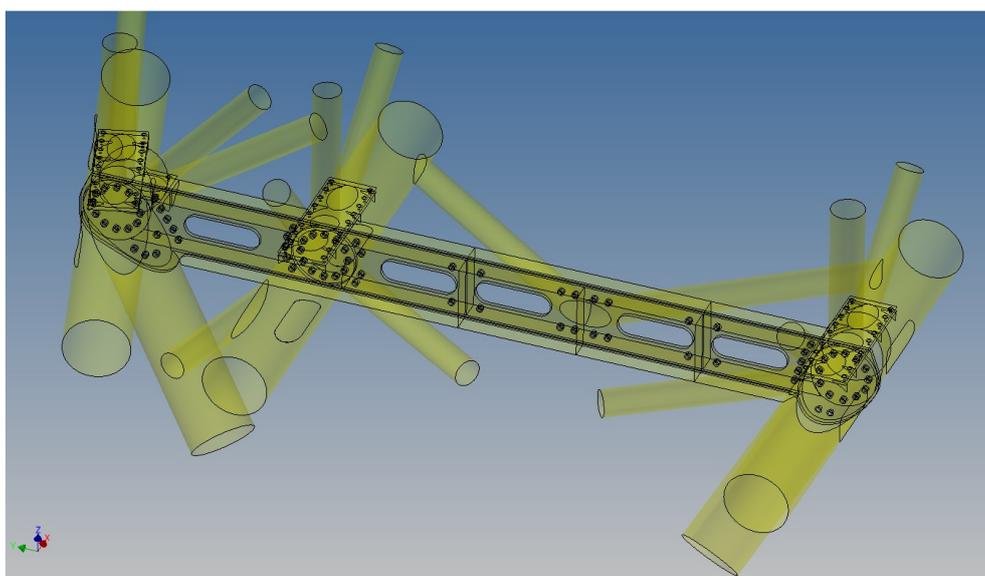


Figura 165. CAD per FEA giunto centrale MSS, dettaglio

Il modello precedente estratto dal software CAD è stato importato direttamente nel CAE Ansys Workbench 2020 R1. Le superfici del modello sono state discretizzate utilizzando elementi 2D SHELL181, mentre i bulloni sono stati modellati nel FEM come elementi trave utilizzando gli elementi BEAM188. La dimensione minima degli elementi impostata per mesh del modello è di **16 mm**. Un dettaglio del giunto centrale meshato è mostrato nella figura seguente (Figura 166).

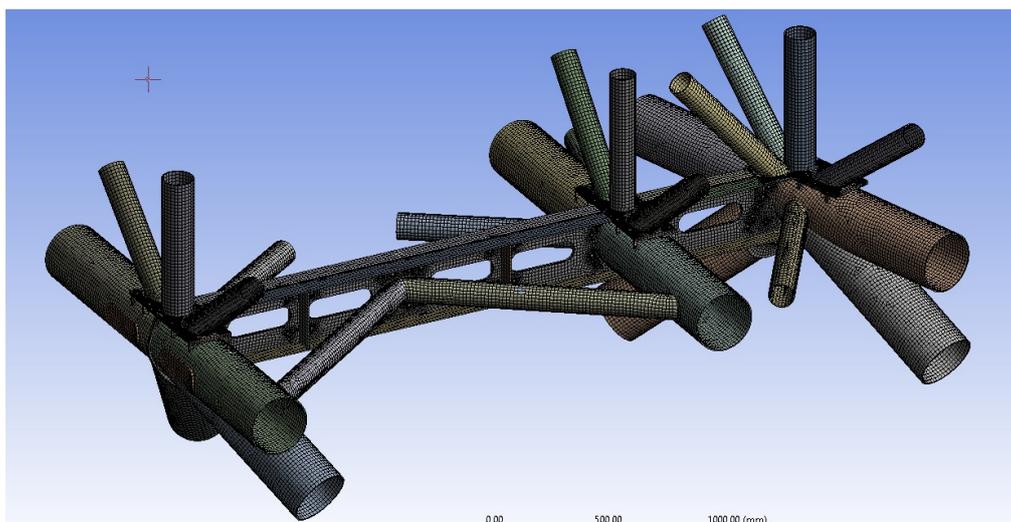


Figura 166. Modello FE meshato del giunto centrale della MSS

I carichi, ovvero le condizioni al contorno del modello, sono stati importati direttamente dal modello FE globale della MSS attraverso la tecnica della sotto-modellazione. Sono stati inseriti nel modello della MSS dei joint dai quali importare le condizioni al contorno nel modello locale. Nella figura seguente (Figura 167) si possono vedere le condizioni al contorno del sottomodello.

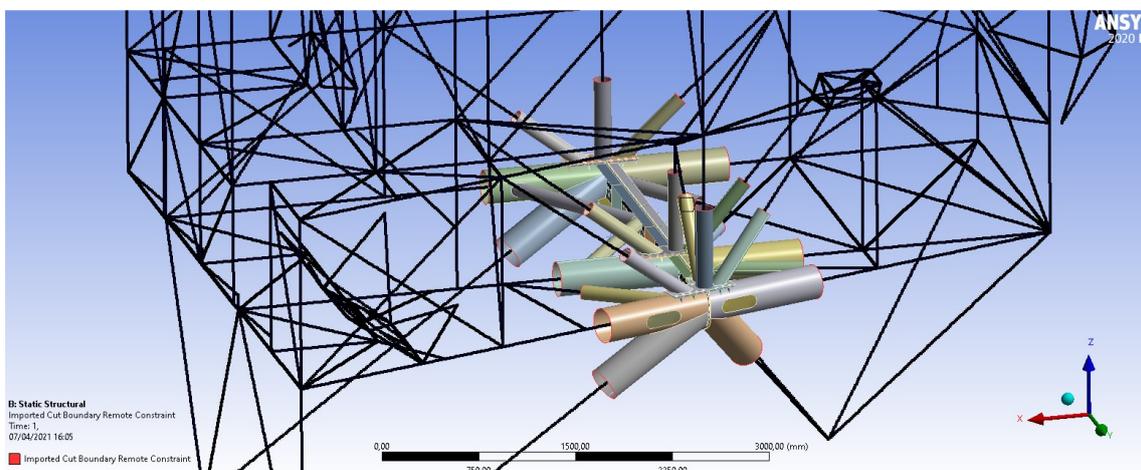


Figura 167. Condizioni al contorno del sottomodello

Collegando i due modelli, gli spostamenti vengono automaticamente importati dai nodi più vicini del modello globale della MSS ed imposti ai bordi di taglio del sottomodello, evidenziato in rosso nella figura precedente (Figura 167). Il sottomodello risulta così propriamente vincolato dagli spostamenti remoti importati e l'unico altro carico esterno è rappresentato dal campo di accelerazioni da settare. Il campo di accelerazioni imposte è illustrato nella tabella seguente ed è stato scelto perché risulta il caso di carico più critico per questo giunto.

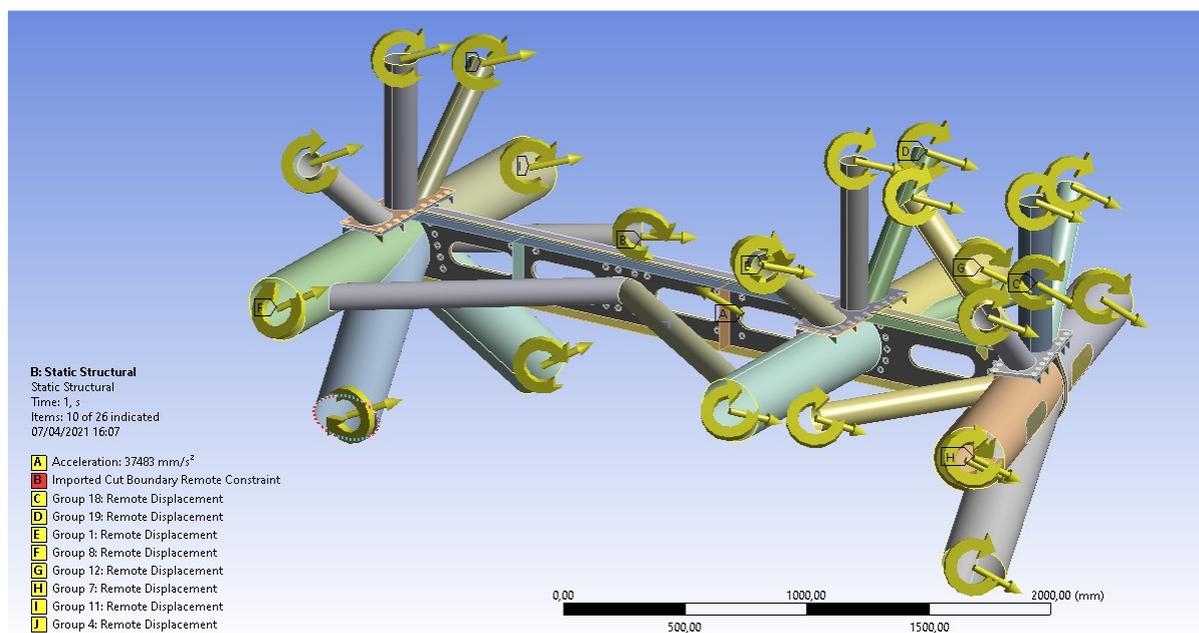


Figura 168. Spostamenti remoti del sottomodello

X-direction [mm/s ²]	Y-direction [mm/s ²]	Z-direction [mm/s ²]
9708,5	-32361,8	16230

Figura 169. Accelerazioni di terremoto per caso di carico 13

Per simulare opportunamente il comportamento dei bulloni è stato utilizzato un contatto non lineare tra le superfici imbullonate. Non essendo consentita alcuna penetrazione dei corpi, le superfici risultano prive di scorrimento e separazione. Le travi che rappresentano i bulloni sono fissate alle superfici. Le sezioni trasversali di inerzia dei bulloni sono sezioni circolari con un diametro di 16 mm e 12 mm, poiché nel modello CAD vengono utilizzati bulloni M16 e M12.

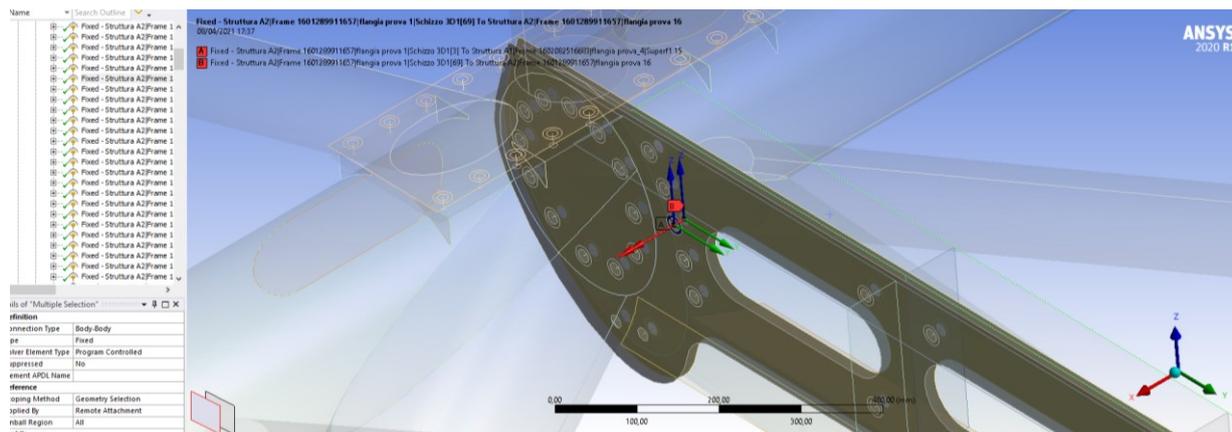


Figura 170. Dettaglio bulloni del sottomodello

6.2.1 Risultati FEA

I risultati delle analisi strutturali sul sottomodello in termini di spostamenti e sollecitazioni equivalenti massime di Von Mises sono stati confrontati con i risultati dell'intero modello globale della MSS, nelle zone sotto studio, sia al fine di verificare la corretta importazione delle condizioni al contorno che la rispondenza dei risultati tra i due modelli FE (Figura 171).

Come si può notare dall'immagine a pagina seguente, c'è un'ottima corrispondenza tra il campo degli spostamenti del sottomodello e quello del modello FE globale della MSS.

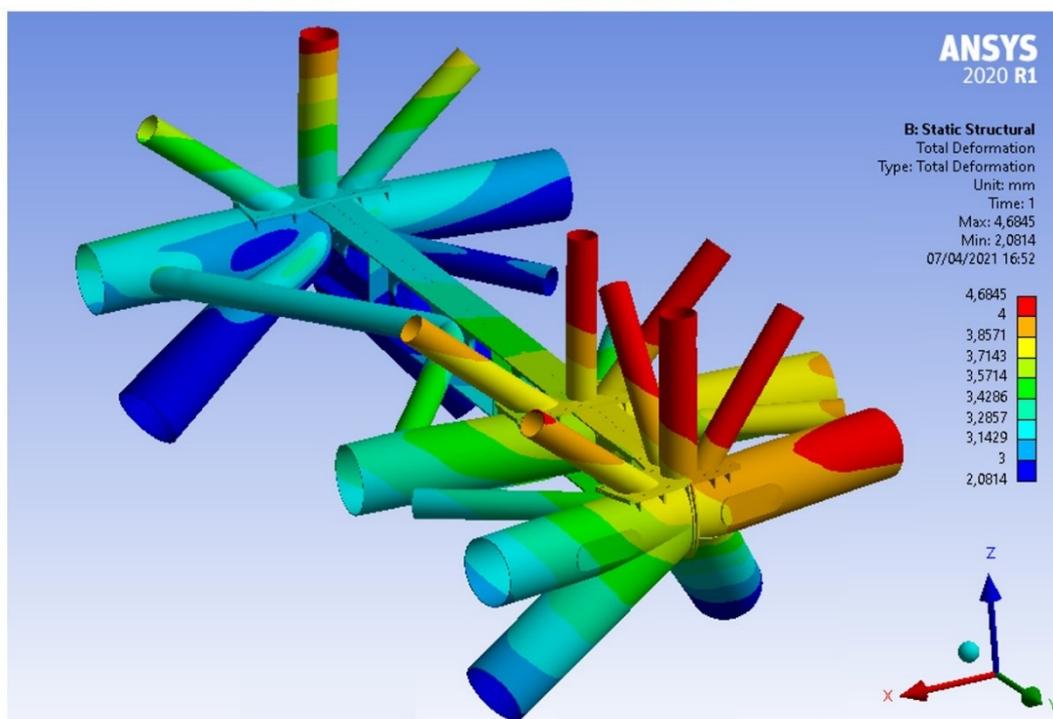
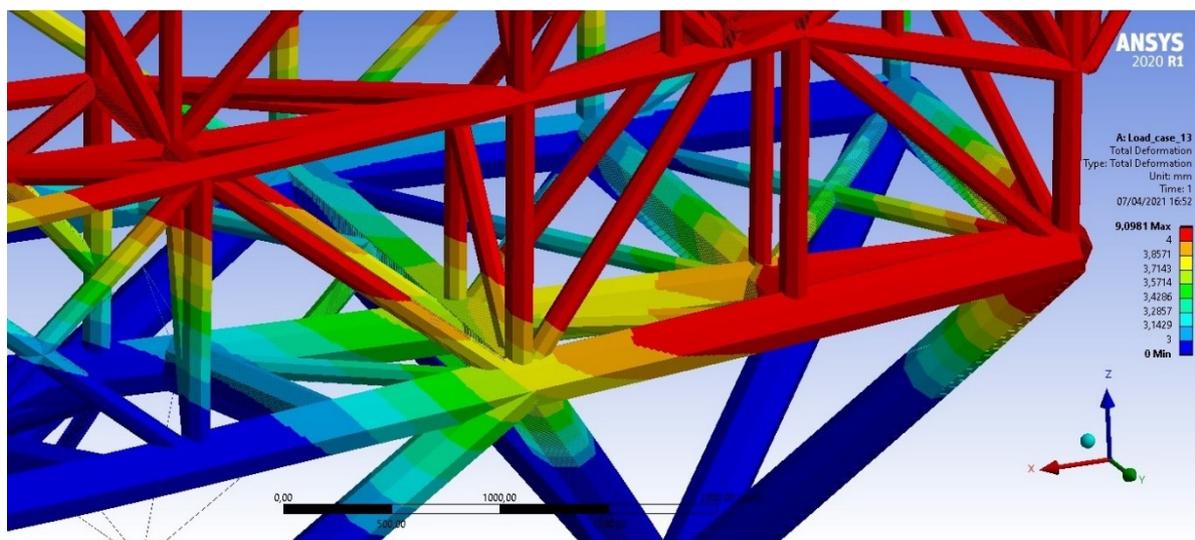


Figura 171. Confronto dello spostamento massimo tra il modello FE globale e locale

Lo stesso confronto è stato operato anche per gli Stress equivalenti massimi di von Mises come mostrato nella figura a pagina seguente (Figura 172).

Il valore massimo della sollecitazione equivalente di von Mises, ottenuto dal modello locale, è di **240 MPa**. Come precedentemente illustrato, il **RF** è calcolato secondo quanto dichiarato nell'ESO Engineering Analysis Standard e nel paragrafo 4.5.1.

$$\sigma_{\text{yieldS355JR}} > \sigma_{\text{max}} \rightarrow 355 \text{ MPa} > 240 \text{ MPa} \rightarrow \mathbf{RF} = 355 / (240 * 1.1 * 1.15) = \mathbf{1.17} > \mathbf{1.0}$$

L'acciaio strutturale utilizzato è un **S355JR** con carico di snervamento di 355 MPa. Per una descrizione dettagliata del materiale fare riferimento al paragrafo 4.4.2.

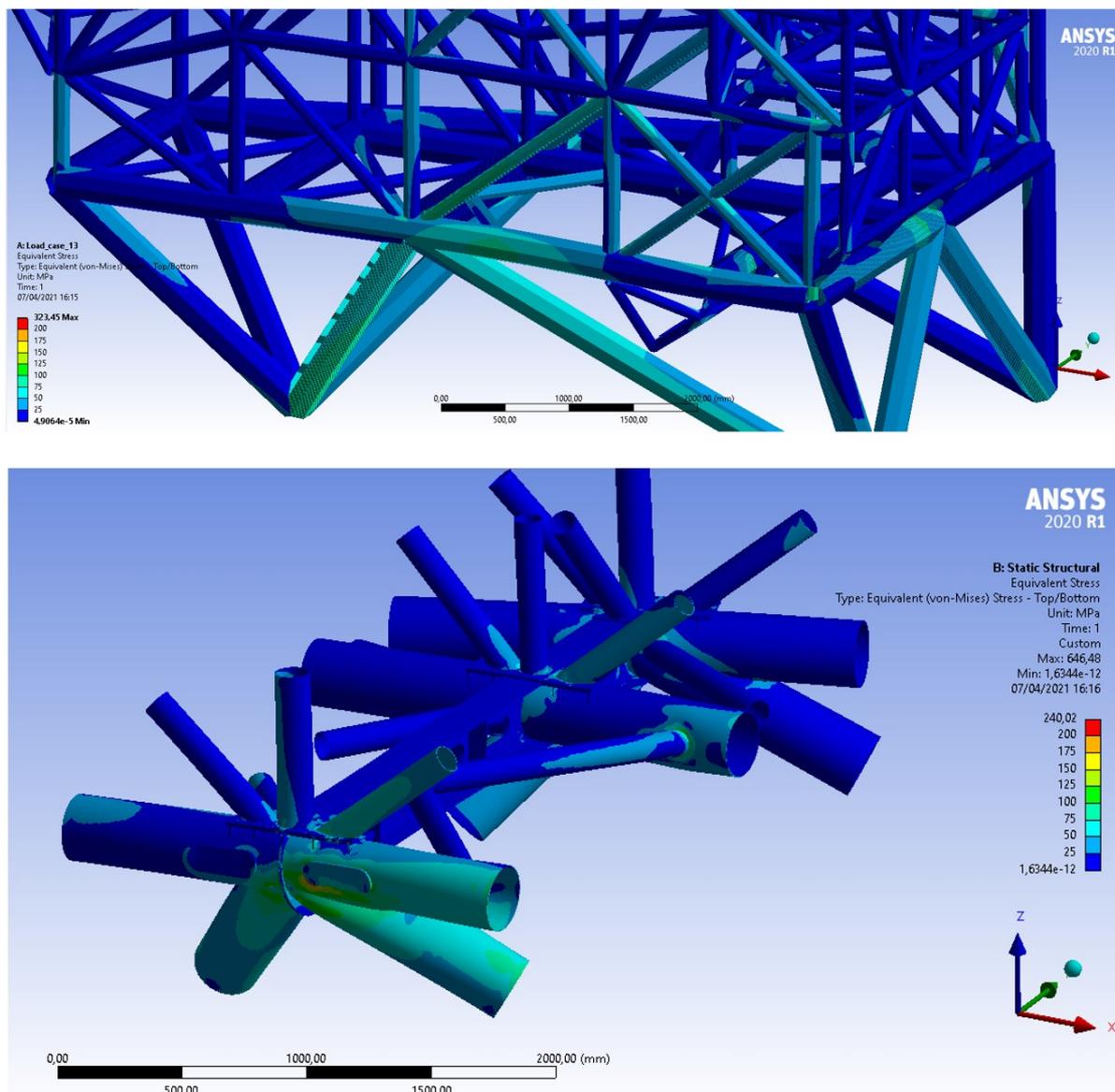


Figura 172. Confronto Stress equivalente del modello FE globale e locale

Il sottomodello FE fornisce feedback anche sui bulloni, che sono stati modellati come elemento trave per stimarne i carichi assiali. La figura successiva, infatti, mostra i carichi assiali agenti sui bulloni presi in esame (Figura 173).

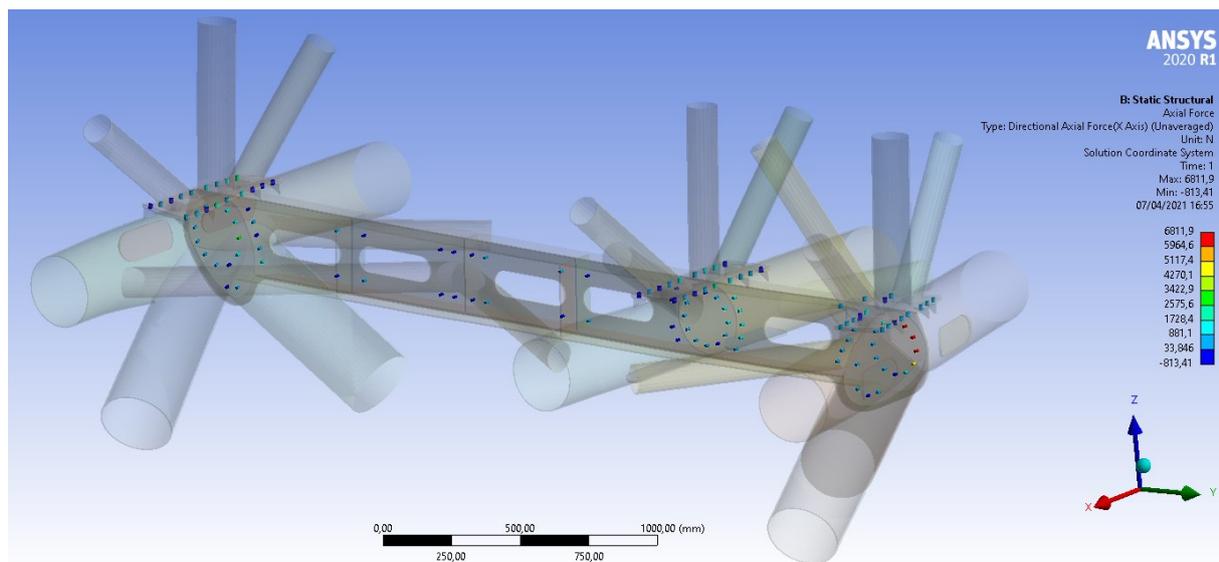


Figura 173. Risultati FEA bulloni sottomodello giunto centrale, sforzo assiale

Il valore massimo della sollecitazione equivalente von Mises agente sui bulloni è mostrato nella figura seguente e risulta essere **646.5 MPa**. Come precedentemente fatto, il **RF** è calcolato secondo quanto prescritto nel paragrafo 4.5.1.

$$\sigma_{\text{yieldS355JR}} > \sigma_{\text{max}} \rightarrow 900 \text{ MPa} > 646.5 \text{ MPa} \rightarrow \text{RF} = 900 / (646.5 * 1.1 * 1.15) = 1.1 > 1.0$$

quindi la scelta dei bulloni appartenenti alla classe “10.9” può essere considerata idonea. Il loro limite di snervamento è, infatti, di 900 MPa.

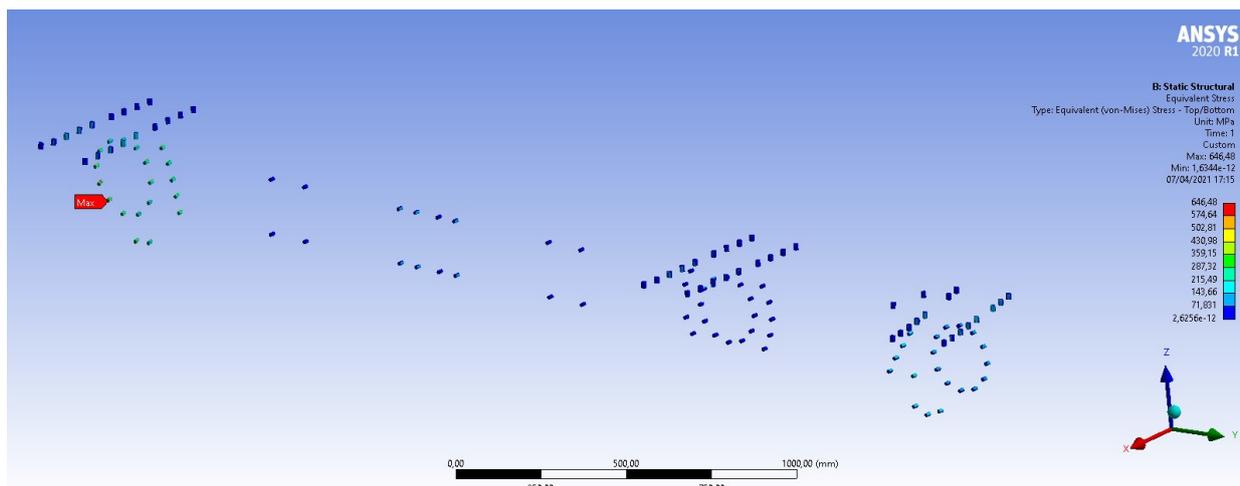


Figura 174. Risultati FEA bulloni sottomodello giunto centrale, sollecitazione massima equivalente

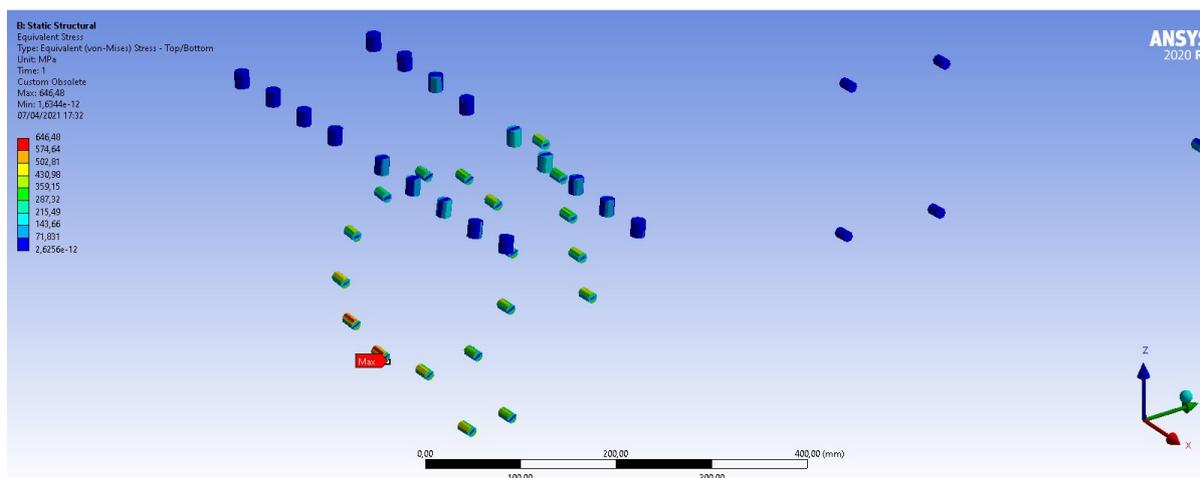


Figura 175. Risultati FEA bulloni giunto centrale, sollecitazione massima equivalente dettaglio

6.3 Giunto per Optomech – FEM

Il secondo sottomodello analizzato è denominato “giunto per Optomech”. Si trova all'interfaccia tra le OSS (Optomechanical Support Structure) di M8 e M10 e la Main Support Structure. Il particolare posizionamento sulla MSS e i dettagli geometrici sono mostrati in Figura 176.

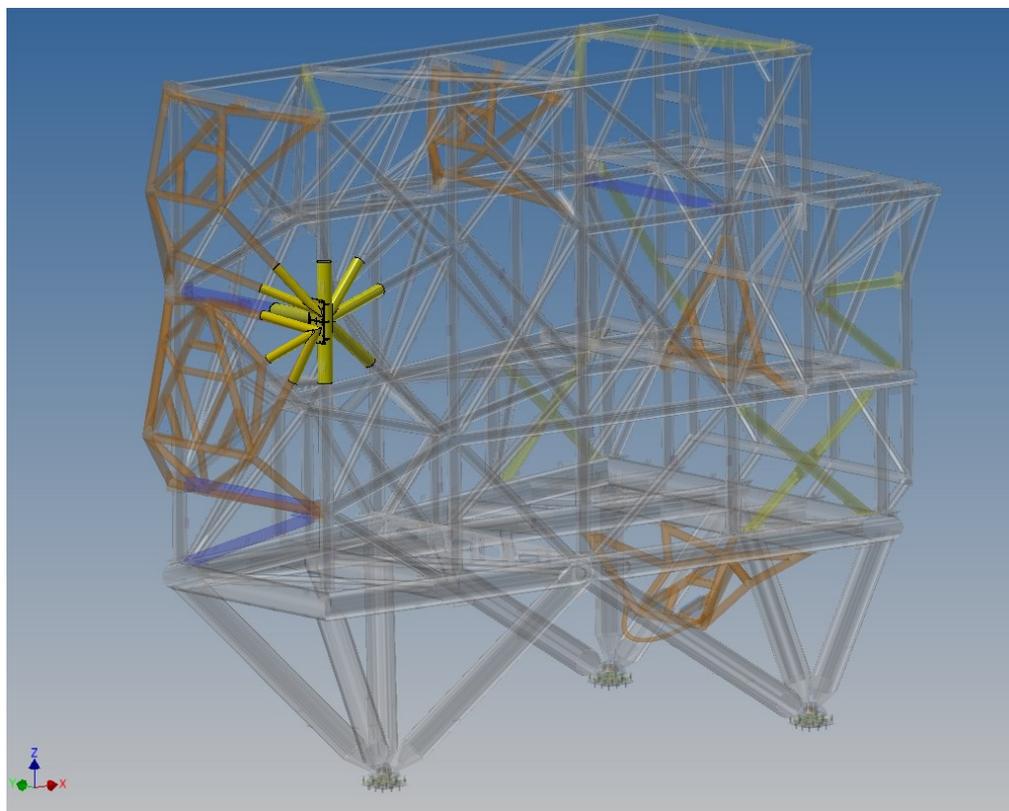


Figura 176. Modello CAD del giunto per Optomech sulla MSS

Come nel caso precedente, trattandosi sempre di elementi tubolari ed al fine di non aumentare inutilmente l'onere computazionale del modello, la geometria viene modellata utilizzando elementi di superficie 2D. Questa scelta è giustificata dal piccolo spessore degli elementi tubolari utilizzati rispetto alle altre dimensioni della geometria in esame. Il modello CAD per la FEA, interamente modellato per superfici è mostrato nell'immagine successiva (Figura 177).

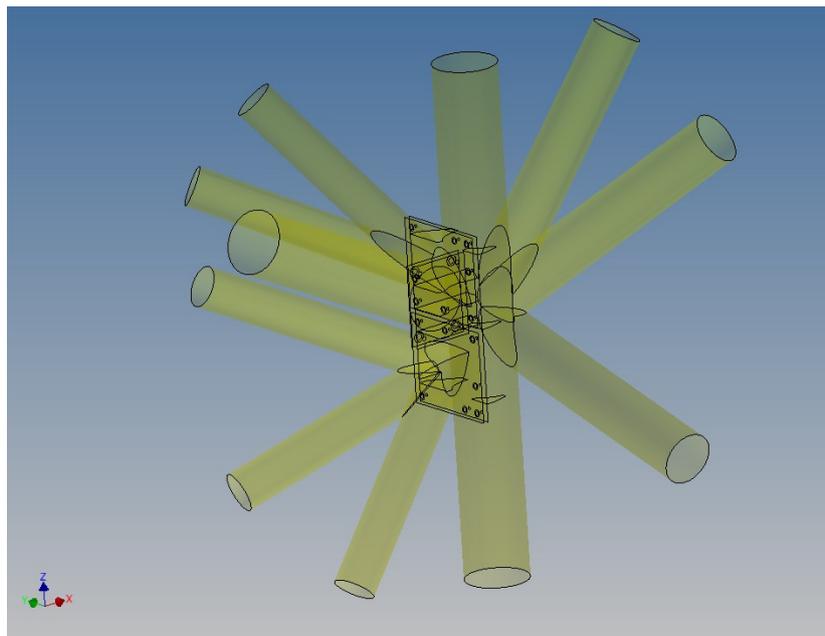


Figura 177. Modello CAD giunto per Optomech

Le superfici geometriche del modello CAD 3D sono state discretizzate nel CAE Ansys utilizzando elementi 2D SHELL181, mentre i bulloni di connessione sono modellati come elementi trave utilizzando le BEAM188. La dimensione minima dell'elemento meshato nel FEM risulta essere di **8 mm**. Un dettaglio del giunto per Optomech meshato è mostrato nella figura a pagina seguente (Figura 178).

I carichi, ancora una volta, sono stati importati direttamente dal modello FE globale della MSS attraverso la tecnica della sotto modellazione. Oltre alle condizioni al contorno importate, che rappresentano i vincoli del sottomodello, per avere lo stesso set di prova del modello FE globale, è stata impostata una accelerazione da terremoto. Il load case selezionato è lo stesso del giunto centrale, visto precedentemente, con i valori delle accelerazioni dichiarati in Figura 169.

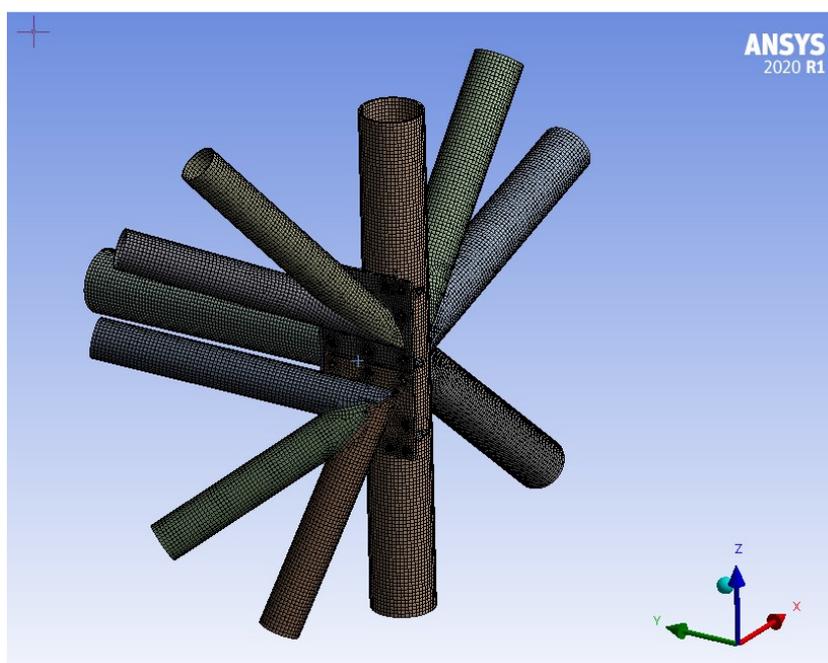


Figura 178. FEM giunto per Optomech

Le condizioni al contorno importate dal modello globale al sottomodello locale del giunto per Optomech sono mostrate nella figura seguente (Figura 179).

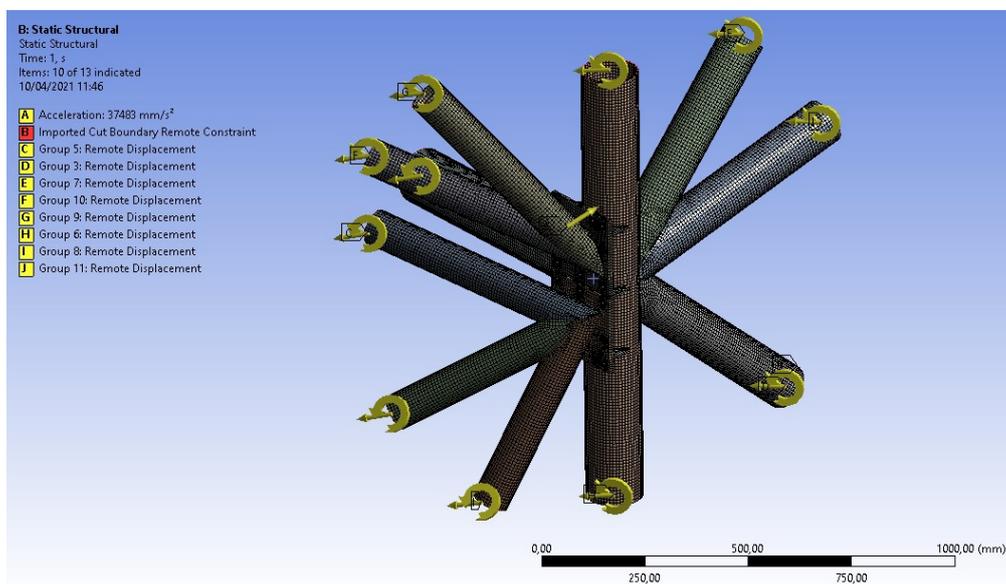


Figura 179. Condizioni al contorno del giunto per Optomech

Anche in questo secondo caso in esame sono state utilizzate delle travi a sezione circolare per simulare il comportamento dei bulloni. L'analisi FE è stata impostata come analisi non lineare a causa dei contatti tra le superfici dei giunti imbullonati.

6.3.1 Risultati FEA

Le figure successive mostrano i risultati di tutte le verifiche strutturali eseguite sul sottomodello del giunto per Optomech. I risultati delle analisi sul sottomodello sono isolati prima per il sottomodello FE completo e, poi, per i soli bulloni. Il valore portato all'attenzione è sempre la massima sollecitazione equivalente di Von Mises prima nel corpo strutturale del sottomodello FE del giunto optomeccanico e poi, nel secondo caso, negli elementi di fissaggio.

Il valore massimo dello stress di von Mises, mostrato nell'immagine successiva (Figura 180) è di **95 MPa**. Come precedentemente illustrato, il **RF** è calcolato secondo il paragrafo 4.5.1 come:

$$\sigma_{\text{yieldS355JR}} > \sigma_{\text{max}} \rightarrow 355 \text{ MPa} > 95 \text{ MPa} \rightarrow \mathbf{RF} = 355 / (95 * 1.1 * 1.15) = \mathbf{2.95} > \mathbf{1.0}$$

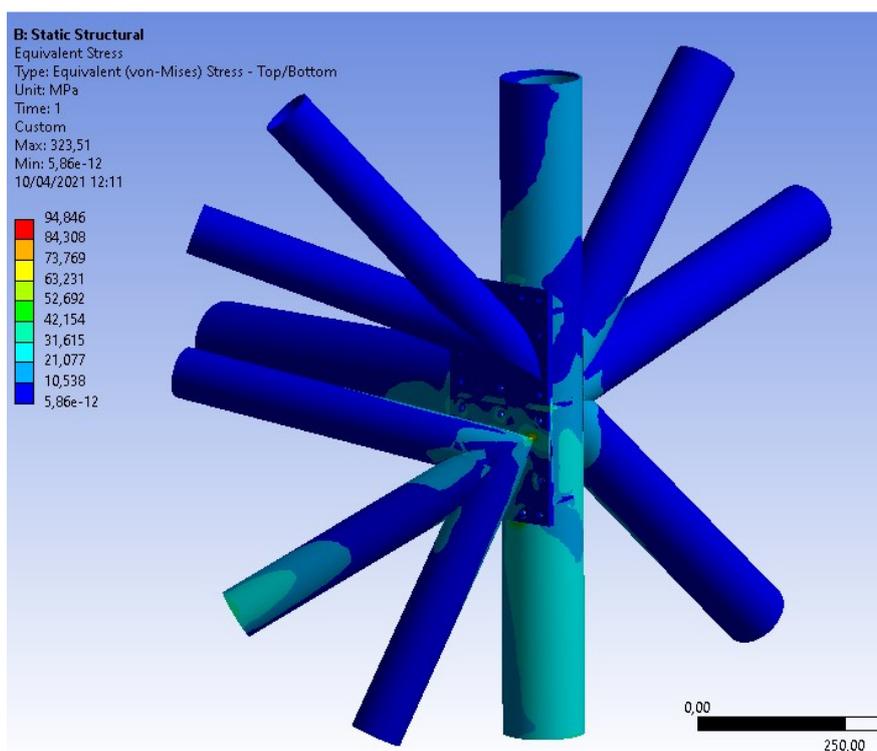


Figura 180. Sollecitazione equivalente massima del giunto per Optomech

Come si può notare, le sollecitazioni equivalenti di von Mises sono inferiori rispetto al caso studiato precedentemente: ciò porta alla conclusione intuitiva che i nodi nella parte inferiore della MSS sono molto più sollecitati di quelli nella parte superiore. La tipologia di acciaio utilizzata è un S355JR con carico di snervamento a 355 MPa, come nel caso precedente del giunto centrale.

Il sottomodello FE viene anche utilizzato per il dimensionamento dei bulloni di collegamento dei vari elementi, che sono stati modellati come travi. La figura successiva mostra i carichi assiali agenti sulle beam (Figura 181).

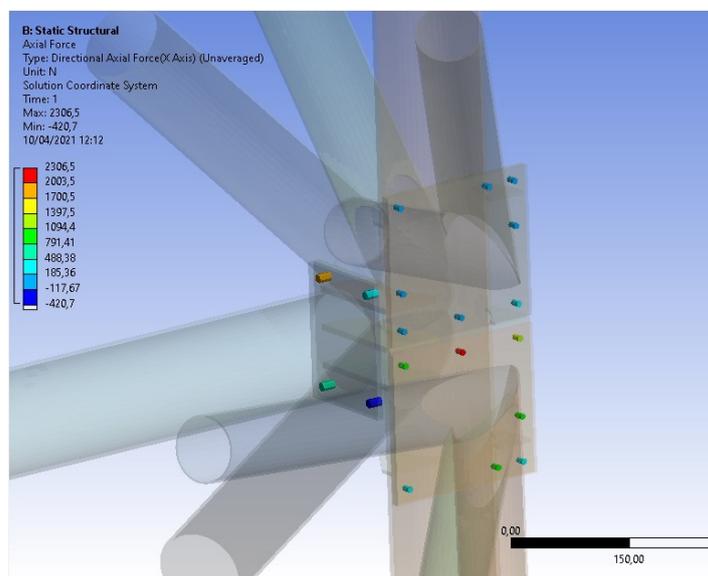


Figura 181. Bulloni Risultati FEA giunto per Optomech, forza assiale

Il valore massimo della sollecitazione equivalente di von Mises che agisce sui bulloni è mostrato nella figura successiva (Figura 182) ed è pari a **323.5 MPa**. Si calcola l'**RF** analogamente a prima.

$$\sigma_{\text{yieldS355JR}} > \sigma_{\text{max}} \rightarrow 900 \text{ MPa} > 323.5 \text{ MPa} \rightarrow \text{RF} = 900 / (323.5 * 1.1 * 1.15) = 2.2 > 1.0$$

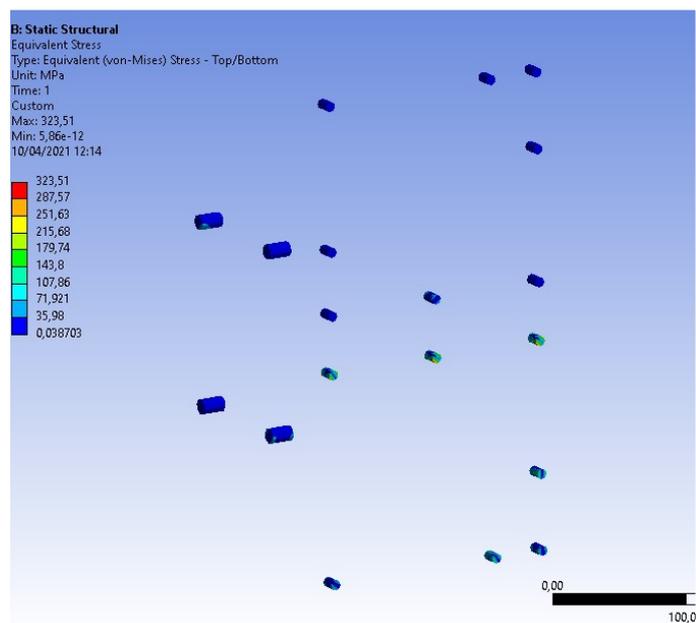


Figura 182. Bulloni Risultati FEA giunto per Optomech, sollecitazione massima equivalente



7. CONCLUSIONI

Il presente lavoro di dottorato rappresenta, ad oggi, la sintesi del mio percorso formativo, incardinato nel contesto ESO-ELT ed atto allo sviluppo di tecnologie innovative per osservazioni da terra. Il viaggio che vi ho condiviso in queste pagine, formalmente, è durato “solo” 3 anni, la durata del PhD dal 2019 ad oggi ma, in realtà, racchiude e sintetizza tutto il lavoro svolto negli ultimi 4 anni in INAF e beneficia di almeno altrettanti anni di esperienza professionale maturata, precedentemente, in contesti industriali.

Durante questo percorso ho avuto il privilegio di seguire tantissimi corsi e seminari di altissimo livello che hanno strutturato ulteriormente la mia formazione ma, soprattutto, il mio spirito critico. Ho sempre creduto fermamente, infatti, nella enorme qualità formativa che può offrire l’Università Italiana e, nello specifico per la mia “piccola” esperienza, nella qualità della Federico II di Napoli. Ho avuto la grandissima opportunità di riuscire ad abbinare al mio percorso da Assegnista di ricerca in un ente pubblico di ricerca italiano, l’Istituto Nazionale di Astrofisica, un percorso di Dottorato di ricerca nella Facoltà di Ingegneria in cui sono cresciuto umanamente e scientificamente, dal primo esame della laurea triennale fino alla scrittura di questo elaborato di tesi di PhD. È proprio **grazie alla collaborazione tra INAF-OACN** (INAF - Osservatorio Astronomico di Capodimonte) **ed UNINA-DII** (UNINA - Dipartimento di Ingegneria Industriale) che è stato possibile realizzare un lavoro dai contenuti così ampi, eterogenei e trasversali.

È stato necessario un investimento importante anche sulla mia formazione di partenza per intraprendere un percorso così ambizioso. Dapprima mi sono approcciato allo studio del mondo **ESO ground-based** e poi ho approfondito i concetti e la user experience degli ambienti di simulazione CAE. In questi anni, sono stato designato anche come referente software INAF per il programma **CAE Ansys**, il tool di calcolo agli elementi finiti con cui sono svolte tutte le simulazioni, per le analisi FEA, oggetto di questa tesi di PhD.



Il lavoro che vi ho riportato in questa tesi, come dichiarato anche nella stessa introduzione, non rappresenta solo il mio progetto di ricerca per il dottorato. È doveroso dire che rappresenta il goal di un lavoro di gruppo, rappresenta l'avanzamento formale di uno dei più grandi progetti astronomici mai concepiti in ambito ESO. Mi piace definirlo come la risposta a molti perché. Tutti i perché con i quali deve convivere un ingegnere che fa ricerca e, grazie ad un percorso di PhD, ha modo di indagarne anche gli aspetti più peculiari.

Questo lavoro, come ampiamente dichiarato, rappresenta solo una parte di quello presentato ad ESO per la review formale dello strumento MORFEO. Il work package di cui sono deputy WP Manager in INAF-OACN, chiamato PM0 - Main Structure, che si occupa della progettazione meccanica e della validazione strutturale dello strumento, ha superato pienamente la fase di Preliminary Design Review con ESO, in tempi brevissimi e pressoché senza nessun rilievo significativo.

Tutto il processo di progettazione e validazione strutturale, infatti, è stato sviluppato seguendo le linee guida tracciate da ESO nei suoi documenti di riferimento. È stato fondamentale anche uno studio molto approfondito della documentazione ESO per cercare di evitare o prevenire problemi in fase di sviluppo del design ma, anche solo di concettualizzazione delle idee. Come presentato nel lavoro di tesi è evidente che non è stata affrontata solo una parte della progettazione meccanica ma, si è partiti essenzialmente da un volume disponibile in piattaforma Nasmyth per arrivare al dimensionamento del collegamento bullonato sulla piattaforma stessa. Come detto in precedenza, la **MSS** (Main Support Structure) dello modulo **MORFEO** rappresenta un **case study** per questa tesi di PhD ma, gli stessi ragionamenti e considerazioni, opportunamente tarati e ricalibrati sui casi specifici in esame, sono stati affrontati per tutti gli altri item sotto responsabilità di PM0.



La vera particolarità di questo lavoro di tesi consiste nell'aver affrontato, con un approccio totalmente innovativo, la progettazione meccanica di un modulo di ottica adattiva per ELT.

Anziché estendere il concetto di “banco ottico”, dal laboratorio metrologico al Cassegrain o alla piattaforma Nasmyth di un telescopio, **si è deciso di cambiare completamente paradigma**. In tutta onestà, la sfida era già stata lanciata dal momento in cui si partecipa alla progettazione del telescopio più grande del mondo. I requisiti e le specifiche tecniche ESO risultavano impossibili da rispettare per le strutture tradizionali e, da qui, è nata l'idea innovativa di sviluppare uno strumento posto in verticale con una struttura a traliccio reticolare portante. Dall'idea in avanti, tutto lo sviluppo del design, è stato ampiamente trattato e discusso nei vari capitoli di questa tesi.

Gli sviluppi futuri di questo lavoro di tesi sono essenzialmente due: continuare la fase di progettazione e sviluppo meccanico di MORFEO nella prossima **FDR** (Final Design Review) ed investigare gli aspetti caratteristici del processo di progettazione meccanica e validazione strutturale al fine di migliorarne la qualità, l'efficienza e le tempistiche. **In sostanza, migliorare prodotto e processo**. La mia più grande soddisfazione è che, essenzialmente, entrambi gli sviluppi sono già in corso. Per la **FDR dello strumento** siamo nella fase di controllo e verifica delle specifiche di progetto, nonché nel supporto alle attività FEA di sistema atte a tale scopo.

Per quanto riguarda il miglioramento del processo di progettazione **grazie ad un mini-Grant INAF**, un finanziamento alla ricerca di base a carattere nazionale promosso da INAF, **di cui sono risultato assegnatario** nell'agosto del 2022, potrò migliorare e maturare ulteriori conoscenze nell'ambito della “**progettazione avanzata ed integrata**”.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Diolaiti, E. et al, Preparing for the phase B of the E-ELT MCAO module project, Proc. SPIE 9148, 91480Y (2014).
- [2] Diolaiti, E. et al, MAORY: adaptive optics module for the E-ELT, Proc. SPIE 9909, 99092D, (2016).
- [3] Lombini, M. et al, Optical design of the Post Focal Relay of MAORY, Proc. SPIE 9908, 9908AB, (2016).
- [4] De Caprio, V. et al, MAORY for ELT: preliminary mechanical design of the support structure, Proc. SPIE 10703, 107034H (2018).
- [5] Lombini, M. et al, Optical design of the post focal relay of MAORY, Proc. SPIE 10690, 1069011, (2018).
- [6] De Caprio, V. et al, MAORY Main Structure design: general overview, Proc. SPIE 11448-156 (2020).
- [7] Cianniello, V., et al., “Structural Analyses of the MAORY/MORFEO Main Support Structure at global level for Preliminary Design Review”, Proc. SPIE, 12184-138 (2022), in these Proceedings.
- [8] Cascone, E., et al., “General overview of MORFEO (formerly known as MAORY) Instrument Control Hardware design”, Proc. SPIE, 12184-110 (2022), in these Proceedings.
- [9] Ciliegi, P., et al., “MAORY@ELT: general overview up to the preliminary design and a look towards the final design”, Proc. SPIE, 12185-40 (2022), in these Proceedings.
- [10] Cianniello, V., et al “Finite Element modelling technique: trade-off between two different FE models of a mechanical selector for Astronomical Instrumentation”, Proc. SPIE, 12184-97 (2022) in these Proceedings.
- [11] Cianniello, V., et al “Global to Local FEA validation for complex geometries: submodeling technique applied to mechanical structures for ELT class of instrumentation”, Proc. SPIE, 12184-96 (2022) in these Proceedings.
- [12] D’Auria, D., et al., “Mechanical and electronic design of the MORFEO (formerly known as MAORY) Calibration Unit selector”, Proc. SPIE, 12184-109 (2022), in these Proceedings.
- [13] Redaelli, E., et al., “MAORY@ELT: Optomechanical preliminary design”, Proc. SPIE, 12185-177 (2022), in these Proceedings.
- [14] Aliverti, M., et al., “MAORY@ELT: Thermal Control System preliminary design”, Proc. SPIE, 12185-176 (2022), in these Proceedings.
- [15] Pariani, G. et al, MAORY optical design and performances: status at preliminary design review, Proc. SPIE 12185-212 (2022), in these Proceedings.
- [16] Farinato, J., et al., “The MAORY MAIT strategy in Europe”, Proc. SPIE, 12185-267 (2022), in these Proceedings.
- [17] Riva, M., et al., “MAORY@ELT: System Engineering activity up to preliminary design review”, Proc. SPIE, 12187-60 (2022), in these Proceedings.



- [18] Cascone, E., et al., "MAORY Instrument Control Hardware: general overview", Proc. SPIE 11447, 1144735 (2020).
- [19] Di Rico, G., et al., "MAORY@ELT: Calibration Unit overview", Proc. SPIE, 12185-204 (2022), in these Proceedings.
- [20] Ciliegi, P., et al., "MAORY: the adaptive optics module for the Extremely Large Telescope (ELT)", Proc. SPIE 11448, 114480Y (2020).
- [21] Ciliegi, P., et al., "MAORY: a multi-conjugate adaptive optics relay for E-ELT", ESO Messenger, No. 182 (2020).
- [22] Eredia, C., et al., "Analysis of the requirements and their impact on the design of electronic cabinets for the current generation of ESO ELT instruments", Proc. SPIE, 12184-112 (2022), in these Proceedings.
- [23] Eredia, C., et al., "Trade-off between different PLC based architectures of Instrument Control Hardware for ESO ELT class of instrumentation", Proc. SPIE, 12184-111 (2022), in these Proceedings.
- [24] Cianniello, V., et al. "Lightweighting strategies for Main Support Structures of ELT instrumentation", Proc. SPIE 11451, 114512R (2020).
- [25] Chinellato, S., et al., "MAORY: the RAM analysis approach for preliminary design", Proc. SPIE, 12187-9 (2022), in these Proceedings.
- [26] D'Auria, D., et al., "Hazard and failure modes analysis of the Instrument Control Hardware design for ELT class of instrumentation", Proc. SPIE, 12187-53 (2022), in these Proceedings.
- [27] Common ICD between the E-ELT Nasmyth Instruments and the Rest of the E-ELT System issue 4 ESO-253082
- [28] ESO Analysis Standards issue 2 GEN-SPE-ESO-50000-5600
- [29] Common requirements for E-ELT Instruments issue 2 ESO-254547
- [30] ESO Mechanical Standards issue 2 ESO-192984
- [31] Nasmyth Platform Interfaces 1 ESO CAD-135139
- [32] MAORY Main Structure Technical Specifications issue 01 E-MAO-PM0-INA-SPE-002
- [33] MAORY Earthquake Analysis Report issue 01 E-MAO-000-INA-ANR-006
- [34] Definition of earthquake frequency-dependent quasi-static accelerations on Nasmyth instruments Draft ESO-363541
- [35] MAORY System Analysis report issue 02 E-MAO-SE0-INA-ANR-001
- [36] Definition of additional support points for instruments on the ELT Nasmyth platforms issue 4 ESO-321039
- [37] MAORY (E-ELT MCAO) Technical Specification issue 1 ESO-254311
- [38] Interface Control Document Between the E-ELT SCPs and the SCP Clients ESO-262869
- [39] MAORY System Design report issue 02 E-MAO-SE0-INA-DER-001



- [40] Additional Support Points issue 5 ESO CAD-153255
- [41] MAORY System Overview issue 02 E-MAO-000-INA-DER-001
- [42] MAORY Management Plan issue 02 E-MAO-000-INA-PLA-001
- [43] MAORY System MAIT Plan issue 01 E-MAO-000-INA-PLA-010
- [44] ESO PDM Document Types and Definitions issue 1 ESO-231062
- [45] Systems Engineering General Requirements issue 3 ECSS-EST-10C
- [46] System Optical Design and Analysis Report issue issue 01 E-MAO-SF0-INA-DER-001
- [47] Main Structure Design Report issue 01 E-MAO-PM0-INA-DER-001
- [48] MAORY Optomechanics Analysis Report E-MAO-PF0-INA-ANR-001 issue 01
- [49] MAORY Thermal Control System Analysis Report E-MAO-PT0-INA-ANR-001 issue 01
- [50] MAORY Interface Control Document PM0 E-MAO-PM0-INA-ICD-001 issue 01
- [51] MICADO MAORY Interface Control Document (ICD) ELT-ICD-MCD-56300-0066 issue 01
- [52] MAORY Reliability Analysis E-MAO-000-INA-ANR-002_01 issue 01
- [53] MAORY Main Structure MAIT Plan MAO-PM0-INA-PLA-001 issue 01
- [54] ELT-ICD-MCD-56300-0066 MICADO MAORY Interface Control Document (ICD) 01
- [55] MAORY Instrument Control Hardware Design and Analysis Report E-MAO-PH0-INA-DER-001 issue 01
- [56] MAORY Calibration-Test Unit Design Report E-MAO-PU0-INA-DER-001 issue 01
- [57] MAORY Deformable Mirrors Design Report E-MAO-PD0-INA-DER_001 issue 01
- [58] MAORY LGS WFS Design Report E-MAO-PL0-IPA-DER-012 issue 01
- [59] Bressan, G. M.-F.-L.-R. (2018). ELT design status: the most powerful ground telescope. SPIE, 1-21.
- [60] Ciliegi, P., Diolaiti, E., Bellazzini, M., Cortecchia, F., Lombini, M., Abicca, R., . . . Ragazzoni, R. (2018). Organization, management and risk analysis of the MAORY project. SPIE, 1-8.
- [61] D. Philippe e G. Roberto, «OWL Concept Study» 100th issue of the Messenger, 2000. (s.d.).
- [62] dipastro.pd.astro.it/lab_astro_1/dispenseinpdf/INTRODUZIONE.pdf. (s.d.).
- [63] F. Rampini, L. Ghedin, R. Bressan e G. Marchiori, «ELT design status: the most powerful ground telescope» SPIE, 2018. (s.d.).
- [64] G. Marchiori, F. Rampini, S. Mian e R. Bressan, «ELT design status: the biggest dome in astronomy» SPIE, 2018. (s.d.).
- [65] G. Murga, A. Bilbao, L. De Bilbao e T. E. Lorentz, «Design solutions for dome and main structure (mount) of giant telescopes» SPIE, 2016. (s.d.).



- [66] G. Ranzini, *Astronomia. Conoscere, riconoscere e osservare gli oggetti della volta celeste, del sistema solare ai limiti dell'universo*, De Agostini, 2 edizione, 2012. (s.d.).
- [67] Gianpietro Marchiori, F. R. (2018). *ELT design status: the biggest dome in astronomy*. SPIE 1-21.
- [68] Hack, M. (2004). *Vi racconto l'astronomia*. Editori Latenza.
- [69] astrolink.mclink.it/ids/lib/estrapup.htm. (s.d.).
- [70] B. Koehler, «Standard Coordinate Systems and Basic Conventions» ESO. . (s.d.).
- [71] Bely, P. Y. (s.d.). *the design and construction of large optical telescope*. Springer.
- [72] <http://campus.unibo.it/153674/1/CALORE%202014.pdf>. (s.d.).
- [73] http://mguler.etu.edu.tr/WB-Mech_120_Ch04_Static.pdf. (s.d.).
- [74] http://mguler.etu.edu.tr/WB-Mech_120_Ch05_Modal.pdf. (s.d.).
- [75] <http://osservareilcielo.altervista.org/telescopi2.htm>. (s.d.).
- [76] <http://pcfarina.eng.unipr.it/dispense01/stefanini130404/stefanini130404.htm>. (s.d.).
- [77] <http://research.me.udel.edu/~lwang/teaching/MEx81/ansys56manual.pdf>. (s.d.).
- [78] http://web.taed.unifi.it/fisica_tecnica/Carletti/FTA_triennale/trasmissione.pdf. (s.d.).
- [79] http://www.alessiopisani.com/articoli/Ottica_Adattiva.pdf. (s.d.).
- [80] <http://www.arcetri.astro.it/~riccardi/tesi/node11.html>. (s.d.).
- [81] <http://www.astrofilimilano.org/neofiti/dispense/telescopi.pdf>. (s.d.).
- [82] <http://www.brera.mi.astro.it/~mario.carpino/approfondimenti/telescopi.pdf>. (s.d.).
- [83] http://www.danielegasparri.com/Italiano/formule_strumenti.htm. (s.d.).
- [84] <http://www.den.unipi.it/paolo.dimarco/eps/C12hte07.pdf>. (s.d.).
- [85] <http://www.den.unipi.it/paolo.dimarco/eps/C12hte07.pdf>. (s.d.).
- [86] [http://www.dica.unict.it/users/prossi/Files/Files%20Progetto/Lezione%206%20%20Struttura%20\(Azione%20da%20vento\).pdf](http://www.dica.unict.it/users/prossi/Files/Files%20Progetto/Lezione%206%20%20Struttura%20(Azione%20da%20vento).pdf). (s.d.).
- [87] http://www.fmboschetto.it/didattica/pdf/Trasmissione_del_calore.PDF. (s.d.).
- [88] http://www.iaps.inaf.it/asteroseismology/mariapia/DISPENSA%20TELESCOPI_2.pdf.
- [89] <http://www.inaf.it/it>. (s.d.).
- [90] <http://www.inaf.it/it/sedi/osservatorio-di-capodimonte-na>. (s.d.).
- [91] <http://www.labella.altervista.org/AstronomicalNotes/telescopes.html>. (s.d.).
- [92] <http://www.lightfrominfinity.org/Astronomia%20pratica%20per%20neofiti/Astronomia%20pratica%20per%20neofiti.htm>. (s.d.).
- [93] <http://www.oacn.inaf.it/>. (s.d.).
- [94] http://www.oacn.inaf.it/oacweb/oacweb_ricerca/. (s.d.).

- [95] http://www.oact.inaf.it/olimpiadi/File/Telescopi_2019.pdf. (s.d.).
- [96] http://www.risknet-alcotra.org/rna/allegati/18-nov-fantilli_762.pdf. (s.d.).
- [97] <http://www.maory.oabo.inaf.it/>.
- [98] <https://brunelleschi.imss.fi.it/esplora/cannocchiale/dswmedia/esplora/iesplora2.html>. (s.d.).
- [99] <https://digilander.libero.it/astropolaris/PolNews/9806/telescop.htm>. (s.d.).
- [100] <https://eshop.wuerth.it/Innesto-di-sicurezza-con-filetto-femmina-Serie-2000-ATTFEMMDI-SICFILFEMMINA-3-8/069915638.sku/it/IT/EUR/>. (s.d.).
- [101] <https://slideplayer.it/slide/559368/>. (s.d.).
- [102] <https://spazio-tempo-luce-energia.it/elt-il-telescopio-più-grande-del-mondo-71ba42da216c>
- [103] <https://turismoastronomico.wordpress.com/2013/04/04/cose-lastronomia>. (s.d.).
- [104] <https://www.astroshop.de/blog/?p=36290>. (s.d.).
- [105] <https://www.castrocompositesshop.com/it/8-impregnato#>. (s.d.).
- [106] <https://www.celestron.it/faqs/>. (s.d.).
- [107] <https://www.chimica-online.it/fisica/aberrazione-cromatica.htm>. (s.d.).
- [108] <https://www.compositesworld.com/blog/post/automated-preforming-glide-forming>. (s.d.).
- [109] <https://www.docenti.unina.it/webdocenti-be/allegati/materiale-didattico/664409>. (s.d.).
- [110] <https://www.eie.it/progetti/elt-project>. (s.d.).
- [111] <https://www.eso.org/public/about-eso/>. (s.d.).
- [112] <https://www.eso.org/public/ireland/teles-instr/elt/elt-instr/hires/>. (s.d.).
- [113] <https://www.eso.org/public/ireland/teles-instr/elt/elt-instr/maory/>. (s.d.).
- [114] <https://www.eso.org/public/ireland/teles-instr/elt/elt-instr/metis/>. (s.d.).
- [115] https://www.eso.org/public/italy/images/E-ELT_5000_Aug2012/. (s.d.).
- [116] <https://www.eso.org/public/italy/news/eso1018/>. (s.d.).
- [117] <https://www.eso.org/public/italy/news/eso1139/>. (s.d.).
- [118] <https://www.eso.org/public/italy/news/eso9861/>. (s.d.).
- [119] <https://www.eso.org/public/italy/teles-instr/elt/telescope/?lang>. (s.d.).
- [120] <https://www.eso.org/public/italy/teles-instr/paranal-observatory>
- [121] <https://www.eso.org/public/sweden/teles-instr/elt/elt-instr/harmoni/>. (s.d.).
- [122] <https://www.eso.org/public/sweden/teles-instr/elt/elt-instr/metis/>. (s.d.).
- [123] <https://www.eso.org/public/sweden/teles-instr/elt/elt-instr/micado/>. (s.d.).
- [124] <https://www.eso.org/public/sweden/teles-instr/elt/elt-instr/mosaic/>. (s.d.).
- [125] <https://www.eso.org/public/switzerland-it/about-eso/esoglace/>. (s.d.).



- [126] <https://www.eso.org/public/switzerland-it/announcements/ann17037/>. (s.d.).
- [127] <https://www.eso.org/public/switzerland-it/announcements/ann18017/>. (s.d.).
- [128] <https://www.eso.org/public/switzerland-it/science/top10/>.
- [129] <https://www.eso.org/public/teles-instr/alma/>.
- [130] <https://www.eso.org/public/teles-instr/elt/>.
- [131] <https://www.eso.org/public/teles-instr/elt/elt-instr/hires/>. (s.d.).
- [132] <https://www.eso.org/public/teles-instr/elt/elt-instr/micado/>. (s.d.).
- [133] <https://www.eso.org/public/teles-instr/elt/elt-instr/mosaic/>. (s.d.).
- [134] <https://www.eso.org/public/teles-instr/lasilla/>. (s.d.).
- [135] <https://www.eso.org/public/teles-instr/paranal-observatory/vlt/>. (s.d.).
- [136] https://www.eso.org/public/teles-instr/technology/active_optics/. (s.d.).
- [137] https://www.eso.org/public/teles-instr/technology/adaptive_optics/. (s.d.).
- [138] <https://www.eso.org/public/usa/announcements/ann19015/>. (s.d.).
- [139] <https://www.eso.org/sci/facilities/eelt/telescope/design/>. (s.d.).
- [140] <https://www.eso.org/sci/facilities/eelt/telescope/mirrors/>. (s.d.).
- [141] <https://www.eso.org/sci/facilities/eelt/telescope/mstructure/>. (s.d.).
- [142] <https://www.eso.org/sci/publications/messenger/archive/no.176-jun19/messenger-no176-13-15.pdf>. (s.d.)
- [143] <https://www.liceofrancescodassisi.edu.it/documenti/lezioni/fisica/TrasmissioneCalore.pdf>.
- [144] <https://www.marcodepisapia.com/analisi-modale-con-spettro-di-risposta-lanello-mancante/>.
- [145] <https://www.media.inaf.it/2016/02/02/kick-off-maory/>. (s.d.).
- [146] <https://www.media.inaf.it/2016/04/28/danza-laser-nei-cieli-del-paranal/>. (s.d.).
- [147] <https://www.okpedia.it/astronomia>. (s.d.).
- [148] <https://www.scienzainrete.it/articolo/turbolenza-atmosferica-lincubo-degli-astronomi/elena-masciadri/2010-02-23>. (s.d.).
- [149] <https://www.stiferite.com/poliuretano.html>. (s.d.).
- [150] https://www.telescopi-artesky.it/blog/7_il-telescopio-come-funziona.html. (s.d.).
- [151] https://www.univpm.it/Entra/Engine/RAServeFile.php/f/P001087/allegati_doc/convezione.pdf. (s.d.).
- [152] <https://www.vialattea.net/content/1153/>. (s.d.).
- [153] <https://www.wired.it/scienza/spazio/2019/07/27/einstein-ragione-buco-nero-via-lattea/>.
- [154] J.-M Bonnet-Bidaud, F. P. (2009). The dunhuang chinese sky: a comprehensive study of the oldest known star atlas. *Journal of Astronomical History and Heritage*, p. 39-59.



- [155] M. Cayrel, P. Dierickx, A. Förster, F. Derie, L. Jochum, L. Pettazzi, C. Lucuix, C. Haupt, M. Müller, E. Vernet e J.-F. Pirard, «ELT optomechanics: construction status» SPIE, 2018. (s.d.).
- [156] M. Dimmler, T. B. (s.d.). ELT Primary mirror control system. SPIE, 1-11.
- [157] M. Lombini, D. M. (2018). Optical design of the post focal relay of MAORY. SPIE
- [158] M. Lombini, D. Magrin, M. Patti, D. Greggio e et al., «Optical design of the post focal relay of MAORY» SPIE, 2018. (s.d.).
- [159] MAORY - Main Structure Design and Analysis Report OACN, V. D. (2018).
- [160] P. Ciliegi, A. Fontana, A. Comastri, S. Esposito, R. Ragazzoni e P. Feautrier, «MAORY Project Management Plan» ESO. (s.d.).
- [161] P. Ciliegi, E. Diolaiti, R. Abicca, G. Agapito, M. Aliverti e et al., «MAORY for ELT: preliminary design overview» SPIE, 2018. (s.d.).
- [162] P.-Y. Bely, The Design and Construction of Large Optical Telescopes. (s.d.).
- [163] Pelat, P. L.-D.-F.-F.-D. (2008). Observational Astrophysic. Spinger.
- [164] www.astro.unipd.it/ciroid/espfis2/dispense_cap5.pdf. (s.d.).
- [165] www.inaf.it/it/notizie-inaf/e-all2019inaf-che-si-sviluppa-il-cuore-di-e-elt. (s.d.).
- [166] www.microgate.it/Engineering/News/Contratto-M4. (s.d.).
- [167] www.osservatorioalbisenzio.it/argomenti/astronomia/strumenti. (s.d.).
- [168] www.sapere.it/enciclopedia/seeing.html. (s.d.).
- [169] wwwmaory.oabo.inaf.it/wp-content/uploads/2018/06/Paper_SPIE_2018_Ciliegi.pdf.